



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

---

# **Estudio a escala regional de los componentes hidrológicos e hidráulicos del complejo cenagoso del Bajo Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza con apoyo de herramientas de modelación matemática y SIG**

**Julio Cuesta Olave**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2017



# **Estudio a escala regional de los componentes hidrológicos e hidráulicos del complejo cenagoso del Bajo Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza con apoyo de herramientas de modelación matemática y SIG**

**Julio Cuesta Olave**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Civil – Recursos Hidráulicos**

Director:

Ph.D. Erasmo Alfredo Rodríguez Sandoval

Línea de Investigación:

Modelación de Fenómenos y Amenazas Naturales

Grupo de Investigación:

GIREH - Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2017





*Dedicatoria:*

*A Dios, mis padres Belén y Julio; mis hermanos, Juan, Jorge y José; mi señora Yaisa y mi hijo Julián “El Tigre”, motores de vida; por toda su buena energía, comprensión y apoyo. A todos Mil y mil gracias.*



## **Agradecimientos**

Son muchas las personas y entidades a las cuales debo agradecer por haber podido llevar a un feliz término esta investigación; a continuación, trataré de listarlos deseando no olvidarme de ninguno.

En primera instancia al profesor Erasmo Rodríguez, por su dedicación, acompañamiento, sabios consejos, valiosas recomendaciones y confianza depositada en mí para abordar esta investigación.

Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, por haber facilitado los productos provenientes de diferentes sensores remotos (imágenes satelitales), utilizadas en esta investigación.

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, el cual, a través del convenio interadministrativo con la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, facilitó toda la información proveniente de sus estaciones hidroclimatológicas ubicadas en la zona de estudio.

A las corporaciones regionales: CORMAGDALENA, CORPAMAG y CRA, por amablemente facilitar información topográfica y batimétrica de algunas ciénagas y del cauce principal del río Magdalena en la zona de estudio.

Al proyecto de investigación COLCUENCAS por la financiación durante la realización de esta investigación.

A los ingenieros Leonardo Alfonso y Fabio Amador de UNESCO – IHE en Holanda, por amablemente haber facilitado los resultados de su investigación, adelantada en un sector de la misma zona de estudio, dentro del marco del mismo proyecto COLCUENCAS.

A mis docentes en la maestría quienes me guiaron y ayudaron en todo este proceso, en especial a los profesores Carlos Cubillos y Juan Manuel Moreno por su colaboración y valiosos comentarios en la realización de esta investigación, asimismo muchas gracias al ingeniero Eduardo Bravo, quien como director de proyectos de hidráulica fluvial sobre el río Magdalena (convenios interadministrativos entre CORMAGDALENA y la Universidad Nacional sede Bogotá), aportó valiosísimos comentarios para un mejor entendimiento del hidrosistema.

A la Universidad del Norte, en Barranquilla, y allí al profesor Manuel Alvarado por sus amables comentarios e información suministrada sobre la zona de estudio y a la Universidad Nacional sede Medellín (UNALMED), por haber facilitado la herramienta FLOODDEM, utilizada en esta investigación y sugerida para adelantar estudios preliminares de inundación a partir de parámetros geomorfológicos.

Finalmente, agradecimientos especiales a todos mis compañeros y amigos del Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos – GIREH, una gran familia; por su valioso apoyo y fuerza en todo este proceso, entre ellos: Inés Sánchez, Mónica Sarache, Adriana Bermúdez, Álvaro Gómez, Carlos Albeiro Figueroa, Camilo Bernal, Juan Sebastián Hernández, Víctor Manrique, Eduardo León, Henry Murcia y a todos los que no mencioné. A todos muchas gracias y *recuerden que un hombre sin sueños ni ilusiones es un simple mortal.*

## Resumen

El Bajo Magdalena, entre Calamar y Bocas de Ceniza, corresponde a una región con importantes intercambios río – ciénagas, que ha sido reconocida por la convención internacional Ramsar como zona estratégica de preservación mundial. Además, constituye una fuente importante para el desarrollo regional, no sólo por la navegabilidad del río Magdalena, sino por la sostenibilidad de las ciénagas circundantes y conectadas al río, las cuales sirven de sustento importante para las comunidades asentadas en esta zona del país. En la presente década, esta zona experimentó una gran afectación a causa del fenómeno de La Niña (2010 – 2011), evidenciando el poco conocimiento sobre el hidrosistema y la escasez de información para una adecuada gestión del mismo. En esta investigación se estudian a nivel regional, y a partir de la información existente, los componentes hidrológicos e hidráulicos de la zona entre Calamar y Bocas de Ceniza, incluyendo su conexión con la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), complementando la información a partir de productos derivados de sensores remotos. Esto ha permitido no solo conocer preliminarmente cómo son los intercambios hídricos entre las ciénagas y el río Magdalena, sino además identificar las zonas susceptibles a inundación, como un aporte al entendimiento del sistema y a la adecuada gestión de este. Para ello, se ha seguido una propuesta metodológica en aras de abordar la calibración de modelos hidráulicos a partir de la información extraída de sensores remotos la cual se ha aplicado en la zona de estudio. Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios, calibrando el parámetro sensible en la modelación hidráulica que casi siempre resulta ser el coeficiente de rugosidad “ $n$ ” de Manning. El mejor valor de este parámetro se encontró en un rango entre **0.020** a **0.024** para el cauce principal, mientras que para la zona inundable se obtuvieron valores del orden de **0.028 a 0.032**. La evaluación del desempeño de la modelación hidráulica se realizó a partir del cálculo del parámetro “ $F$ ”, ampliamente reportado en la bibliografía científica de inundaciones y con el cual es posible establecer una tendencia adecuada de los valores del coeficiente de rugosidad en la zona analizada a partir de sensores remotos. La zona con mayor susceptibilidad a la inundación resultó ser la de Suan y Santo Tomás, al costado occidental, en jurisdicción de la Corporación

Autónoma Regional del Atlántico (CRA) y los municipios de El Piñón, Salamina y Remolino en el costado oriental, en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG). Para la identificación de las zonas susceptibles a inundación, además de la modelación matemática, se utilizó un criterio geomorfológico a partir del análisis de las geoformas y dinámica fluvial existentes en la zona, con lo cual se logró establecer el cauce histórico del río Magdalena y presentar una propuesta de delimitación del complejo cenagoso del departamento del Atlántico entre el K45 y el K20, medido a partir del cero en el Mar Caribe.

En cuanto a los promedios anuales de intercambios hídricos entre el río Magdalena y las ciénagas circundantes en el período 2009 – 2012, estos muestran un comportamiento alternado y/o cíclico, río – ciénaga y viceversa, con volúmenes máximos de (+168 Mm<sup>3</sup>) hacia la CGSM, hacia la margen oriental. Hacia el costado occidental los mayores aportes se dan hacia el complejo cenagoso del Atlántico, del orden de (+40 Mm<sup>3</sup>). Con respecto a estos valores promedio de intercambio, las cuantificaciones aquí realizadas muestran que para el primer evento La Niña (2010 – 2011), los intercambios hídricos fueron en dirección río – ciénagas con valores mayores en comparación con el período seco (2009 – 2010) que lo antecedió (+627 Mm<sup>3</sup>), donde la dirección de los aportes fue ciénaga – río (-12 Mm<sup>3</sup>). En comparación con el segundo período La Niña (2011-2012), cuando las ciénagas ya estaban llenas, los volúmenes de intercambio disminuyeron su magnitud y permanecieron en dirección río – ciénagas con valores menores al primer período La Niña (+184 Mm<sup>3</sup>). También se demostró la capacidad de regulación de caudales que tiene todo el complejo cenagoso del Bajo Magdalena, donde se registra una regulación cercana al 10% del caudal entrante a través del río Magdalena en épocas húmedas y de los cuales el 6% lo regulan las ciénagas del costado oriental (departamento del Atlántico) y el 4% es regulado por las ciénagas del costado occidental (departamento del Magdalena). Esta regulación se presenta en las ciénagas conectadas o no directamente con el río Magdalena. Es así, como esta investigación aporta al conocimiento de la dinámica hídrica de este valioso hidrosistema con interacción río – ciénagas y contribuye a una mejor toma de decisiones sobre el mismo.

**Palabras clave:** ENOS, Factor de desempeño " $F$ ", FLOODDEM, HEC RAS, HEC-GeoRAS, HEC HMS, HEC-GeoHMS, Iber, inundación, MDT, modelación matemática en hidráulica, modelación matemática en hidrología, Sensores remotos, SIG, Regionalización.

## Abstract

The lower Magdalena, between Calamar and Bocas de Ceniza, corresponds to a region with important river - swamp exchanges, which has been recognized by the international Ramsar convention as a strategic zone of world preservation. In addition, it is an important source for regional development, not only for the navigability of the Magdalena River, but also for the sustainability of the surrounding marshes connected to the river, which serve as important sustenance for the communities settled in this area of the country. In the present decade, this area experienced a great affectation due to the phenomenon of La Niña (2010 - 2011), evidencing the scarce knowledge about the hydrosystem and the scarcity of information for its adequate management. In this research, the hydrological and hydraulic components of the area between Calamar and Bocas de Ceniza, including its connection with the Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), are complemented with existing information derived from remote sensors. This has allowed not only to know how water exchanges occur between the marshes and the Magdalena River, but also to identify areas susceptible to flooding, as a contribution to the understanding of the system and its proper management. For this, a methodological proposal has been followed to approach the calibration of hydraulic models using the information extracted from the remote sensors that has been applied in the study area. The results obtained are considered satisfactory, calibrating the sensitive parameter in the hydraulic modeling that almost always turns out to be the roughness coefficient " $n$ " of Manning. The best value of this parameter was found in a range of 0.020 to 0.024 for the main channel, while for the flood zone the values ranged between 0.028 and 0.032. The evaluation of the performance of the hydraulic modeling was made from the calculation of the parameter " $F$ ", widely reported in the scientific literature of floods and with which it is possible to establish an adequate trend of the values



of the roughness coefficient in the area analyzed. The area with the highest susceptibility to flooding was Suan and Santo Tomas, on the western side, in the jurisdiction of the Corporación Autónoma del Atlántico (CRA) and the municipalities of El Piñón, Salamina and Remolino on the east side, jurisdicción of the Corporación Autónoma del Magdalena (CORPAMAG). For the identification of areas susceptible to flooding, in addition to mathematical modeling, a geomorphological criterion was used based on the analysis of geoforms and river dynamics in the area, which established the historic channel of the Magdalena River and presented a proposal to delimit the Atlantic Swampy complex of the coast between K45 and K20. Measured from zero in the Caribbean Sea.

As for the annual averages of water exchanges between the Magdalena River and the surrounding marshes in the 2009-2012 period, these show an alternative and / or cyclical behavior, river - swamp and vice versa, with maximum volumes of (+168 Mm<sup>3</sup>) to the CGSM, on the eastern bank. Towards the western side, the largest contributions are to the Atlantic marsh complex, on the order of (+40 Mm<sup>3</sup>). With respect to the mean values of exchange, the quantifications performed here show that for the first La Niña event (2010-2011), water exchanges went towards river swamps with higher values compared to the dry period (2009-2010) (+627 Mm<sup>3</sup>), where the direction of the contributions was swamp – river (- 12 Mm<sup>3</sup>). Compared with the second period of La Niña (2011-2012), when swamps were already full, swamp volumes decreased in magnitude and remained in the direction of marshes with values lower than the first period of La Niña (+184 Mm<sup>3</sup>). It was also demonstrated the capacity of regulation of flows that has the entire marsh complex of the low Magdalena, where about 10% of the incoming flow from the Magdalena River in wet times and of which 6% is regulated by marshes. (Department of the Atlantic) and 4% is regulated by the marshes on the western side (Department of Magdalena). This regulation occurs in wetlands connected or not directly with the Magdalena River. Thus, this research contributes to the knowledge of the water dynamics of this valuable hydrosystem with River - swamp interactions and contributes to its better decision-making process.

**Keywords:** ENSO, Performance Factor "*F*", FLOODDEM, HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-HMS, HEC-GeoHMS, Iber, flood, MDT, Mathematical modeling in hydraulics, Mathematical modeling in hydrology, Remote sensing, GIS, Regionalization.



# Contenido

Pág.

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivo general .....	5
1.3 Objetivos específicos .....	5
1.4 Pregunta de investigación .....	6
1.5 Organización del documento .....	6
<b>2. El Bajo Magdalena.....</b>	<b>9</b>
2.1 Resumen de la información primaria y secundaria disponible y recolectada en la zona de estudio. ....	12
2.2 Climatología y geomorfología en la zona de estudio .....	16
2.2.1 Climatología .....	16
2.2.2 Dinámica fluvial en la zona de estudio.....	27
2.3 Comentarios finales del Capítulo 2.....	34
<b>3. Estado del arte y propuesta metodológica.....</b>	<b>37</b>
3.1 Modelación matemática en hidrología .....	43
3.1.1 Aplicación hidrológica propuesta para el área de estudio .....	51
3.2 Modelación matemática en hidráulica.....	55
3.2.1 Aplicación propuesta para el área de estudio .....	59
3.3 Representación digital del terreno y Sistema de Información Geográfica .....	63
3.3.1 Modelos digitales de terreno (MDT) en la zona de estudio .....	64
3.4 Breve descripción de los Sensores remotos y su aplicación en el estudio de los recursos hídricos .....	68
3.5 Evaluación de la modelación hidráulica utilizando imágenes de satélite.....	75
3.6 Marco metodológico y procedimental aplicado para el estudio hidrológico e hidráulico del Bajo Magdalena .....	78
3.6.1 Propuesta metodológica para la calibración de un modelo hidráulico en zonas con información limitada.....	81
3.6.2 Secuencia metodológica para el análisis de la dinámica fluvial. ....	85
3.6.3 Metodología para delimitación de zonas inundables.....	88
3.7 Comentarios finales sobre el Capítulo 3 .....	88
<b>4. Hidrología, hidráulica y dinámica fluvial en la zona de estudio.....</b>	<b>91</b>
4.1 Hidrología de la zona de estudio .....	92
4.2 Hidráulica de la zona de estudio.....	108
4.2.1 Sensibilidad y calibración de parámetros hidráulicos .....	108

4.2.2 Modelación hidráulica zona general de estudio .....	115
4.3 Dinámica fluvial de la zona de estudio .....	127
4.4 Comentarios finales sobre el Capítulo 4.....	129
<b>5. Intercambios hídricos río Magdalena - ciénagas e identificación de zonas susceptibles a inundación entre Calamar y Bocas de Ceniza .....</b>	<b>131</b>
5.1 Intercambios hídricos en la zona particular de estudio .....	131
5.2 Resultados de zonas susceptibles a inundación, criterio conjunto de modelación matemática y dinámica fluvial. ....	153
5.3 Comentarios finales sobre el Capítulo 5.....	162
<b>6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>165</b>
6.1 Conclusiones generales.....	165
Intercambio hídrico. ....	167
Dinámica fluvial y Zonas inundables. ....	168
6.2 Limitaciones y recomendaciones generales.....	170
Recomendaciones costado occidental del río Magdalena jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) .....	171
Recomendaciones costado oriental del río Magdalena jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG). ....	171
Recomendaciones río Magdalena jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del río grande de la Magdalena (CORMAGDALENA). ....	172
Recomendaciones Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. ....	172
Futuros desarrollos. ....	172

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Localización general de la zona de estudio.....	5
<b>Figura 2-1:</b> Áreas de drenaje aferentes al río Magdalena en los costados oriental y occidental de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. ....	10
<b>Figura 2-2:</b> Zona de estudio y sus principales componentes (ríos y ciénagas) en el Bajo Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza. Se localizan aquí las principales estaciones hidrológicas del hidrosistema. Fuente: Elaboración propia. ....	12
<b>Figura 2-3:</b> Localización de 61 estaciones climatológicas en la zona de estudio .....	13
<b>Figura 2-4:</b> Mosaico de Planchas IGAC en la zona de estudio georreferenciadas sobre mapa de alturas sombreado. ....	15
<b>Figura 2-5:</b> Precipitación total multianual estación Los Campanos departamento del Atlántico. ....	17
<b>Figura 2-6:</b> Precipitación total multianual para nueve estaciones ubicadas en el costado occidental departamento del Atlántico. ....	17
<b>Figura 2-7:</b> Precipitación total multianual estación Monterrubio departamento del Magdalena. ....	18
<b>Figura 2-8:</b> Precipitación total multianual 28 estaciones costado oriental departamento del Magdalena.....	19
<b>Figura 2-9:</b> Precipitación promedio mensual multianual en estaciones representativas del norte, centro y sur del área de estudio. a) Costado Oriental y b) Costado Occidental. Fuente: Elaboración propia.....	20
<b>Figura 2-10:</b> Isoyetas de precipitación anual multianual en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. ....	21
<b>Figura 2-11:</b> Precipitación total en la estación Ernesto Cortisoz (1986 – 2011) Vs. anomalía ONI2. (fase neutra). Fuente: Elaboración propia. ....	22
<b>Figura 2-12:</b> Precipitación mensual acumulada (trimestral) en la estación Ernesto Cortisoz (1997 – 1998) Vs. anomalía ONI2. (fase neutra). Fuente: Elaboración propia. 23	
<b>Figura 2-13:</b> Precipitación mensual acumulada (trimestral) en la estación Ernesto Cortisoz (1997 – 1998) Vs. anomalía ONI2. (fenómeno El Niño). Fuente: Elaboración propia. ....	24
<b>Figura 2-14:</b> Precipitación mensual acumulada (trimestral) en la estación Ernesto Cortisoz (2010 – 2011) Vs. anomalía ONI2. (fenómeno La Niña). Fuente: Elaboración propia. ....	24
<b>Figura 2-15:</b> Valores de temperatura promedio anual (1980 – 2011). Fuente: Elaboración propia. ....	25

<b>Figura 2-16:</b> Temperatura anual multianual en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	26
<b>Figura 2-17:</b> Mosaico imágenes Landsat utilizadas en la interpretación geológica. Fuente: (Short and Jr, 1986) .....	28
<b>Figura 2-18:</b> Interpretación geología estructural a partir de la imagen Landsat de la Figura 2-17, en el recuadro se destaca la zona del presente estudio. Fuente: (Short and Jr, 1986).....	29
<b>Figura 2-19:</b> Geomorfología fluvial en la zona de estudio entre Calamar - Bocas de Ceniza. Fuente: Elaboración propia. ....	31
<b>Figura 2-20:</b> Dinámica fluvial río Magdalena entre Calamar – Bocas de Ceniza. Municipios de Sabanagrande y Soledad. Fuente: Elaboración propia. ....	32
<b>Figura 2-21:</b> Dinámica fluvial río Magdalena río Magdalena entre Calamar – Bocas de Ceniza. Municipio de Ponedera. Fuente: Elaboración propia. ....	33
<b>Figura 2-22:</b> Municipios con intervenciones directas o relacionadas con el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	35
<b>Figura 2-23:</b> Registro fotográfico de algunas zonas afectadas durante la ocurrencia de la Fase Niña del ENOS entre 2010 y 2011. A la izquierda el municipio de Suan y a la derecha el municipio de Campo de la Cruz, ambos, en la parte baja de la zona de estudio. Fuente: IDEHA - Gobernación del Atlántico, 2011. ....	35
<b>Figura 3-1:</b> Esquema de flujos de entrada y salida de una ciénaga. Fuente: Adaptado de (CORMAGDALENA-UNAL, 2007).....	41
<b>Figura 3-2:</b> Algunos términos de la ecuación del balance hídrico de la interface suelo – atmósfera – vegetación. Fuente: Adaptado de (Hingray, Picouet, et al., 2014) .....	50
<b>Figura 3-3:</b> Esquema conceptual del algoritmo de contabilidad de humedad en el suelo (SMA por sus siglas en inglés), implementado en el modelo HEC-HMS. Fuente: Adaptado de (U.S. Army Corps of Engineers, 2000). ....	54
<b>Figura 3-4:</b> Esquema conceptual modelo de pérdidas constantes, implementado en el modelo HEC-HMS continuo. Fuente: Elaboración propia .....	54
<b>Figura 3-5:</b> Posibles fuentes de imprecisiones en modelación hidráulica para delimitación de zonas inundables Fuente: Adaptado de (FEMA, 2009). ....	55
<b>Figura 3-6:</b> Ejemplo de representación del terreno y representación de la superficie. Fuente: Adaptado de (Admah, 2012). ....	64
<b>Figura 3-7:</b> Configuración gráfica planeada para la misión EOS. Fuente: Adaptado de (Campbell and Wynne, 2011).....	69
<b>Figura 3-8:</b> Esquema del proceso de percepción remota. Fuente: Adaptado de (Menéndez and Núñez, 2009).....	69
<b>Figura 3-9:</b> División del espectro electromagnético. Fuente: (Olaya, 2011) .....	70
<b>Figura 3-10:</b> a) Imagen 22/11/2010, sensor Radarsat 2, (b) Imagen 22/11/2010, resultado de la clasificación supervisada sobre una máscara o fondo para destacar la cobertura de agua hacia la margen izquierda.....	75
<b>Figura 3-11:</b> Esquema general del proceso metodológico propuesto e implementado en esta investigación. ....	80

<b>Figura 3-12:</b> MDT representación global (ASTERGDEM 30 x 30m) y topobatimetría integrada del cauce principal y cuerpos de agua (ciénagas) de un sector del costado occidental de la zona de estudio. ....	81
<b>Figura 3-13:</b> Propuesta metodológica para la calibración y validación de un modelo hidráulico en zonas con intercambio río-ciénagas, a partir de productos derivados de sensores remotos. ....	82
<b>Figura 3-14:</b> Síntesis general de la metodología propuesta para la calibración de modelos hidráulicos a partir de productos derivados de sensores remotos. ....	85
<b>Figura 3-15:</b> Propuesta metodológica para el análisis de dinámica fluvial e identificación de zonas susceptibles a inundación a partir de criterios geomorfológicos y sensores remotos. ....	86
<b>Figura 3-16:</b> Propuesta metodológica para establecer zonas susceptibles a inundación a partir de modelación matemática y criterios geomorfológicos. ....	88
<b>Figura 4-1:</b> Microcuencas en el área de estudio (Bajo Magdalena). ....	92
<b>Figura 4-2:</b> Interpolación de la precipitación acumulada anual en el área de estudio para el año 2000. ....	94
<b>Figura 4-3:</b> Interpolación de la temperatura promedio anual en la zona de estudio para el año 2000. ....	95
<b>Figura 4-4:</b> Resultado de la Evapotranspiración real media anual en la zona de estudio para el año 2000. ....	95
<b>Figura 4-5:</b> Resultado de la implementación del Balance Hídrico de Largo Plazo (BHLP) para el año 2000. Caudal en m <sup>3</sup> /s. ....	96
<b>Figura 4-6:</b> Caudal medio anual en cada microcuenca con BHLP y caudal acumulado período 1980 – 2010. ....	97
<b>Figura 4-7:</b> Caudal promedio anual en el Bajo Magdalena estimado con BHLP y caudal promedio anual río Magdalena obtenido de información hidrométrica período 1980 – 2010. ....	98
<b>Figura 4-8:</b> Microcuenca <i>ID 13</i> para calibración de parámetros en modelación hidrológica <i>HEC-HMS v 4.1</i> . ....	102
<b>Figura 4-9:</b> Resultados modelación hidrológica inicial microcuenca <i>ID 13</i> en <i>HEC-HMS v4.1</i> . ....	103
<b>Figura 4-10:</b> Resultados modelación hidrológica hidrograma calibrado en la microcuenca <i>ID 13</i> en <i>HEC-HMS v4.1</i> . ....	104
<b>Figura 4-11:</b> Resultados modelación hidrológica calibración de parámetros en la microcuenca <i>ID 13</i> en <i>HEC-HMS</i> . ....	105
<b>Figura 4-12:</b> Esquema general de modelación hidrológica de la zona de estudio en la herramienta computacional <i>HEC-HMS</i> . ....	106
<b>Figura 4-13:</b> Resultados en algunas microcuencas de la zona de estudio, de la modelación hidrológica efectuada para el período 2008-2011. ....	107
<b>Figura 4-14:</b> Zona para ejercicio de calibración del parámetro sensible “ <i>n</i> ” de Manning y discretización en el modelo hidráulico <i>1D</i> . ....	108
<b>Figura 4-15:</b> Gráfica de niveles de agua en las estaciones Calamar y Puerto PIMSA (2010-2012). Fuente: <i>LEH – Flores, plano 17. Ref: E-004-013-12, mayo de 2012.</i> ....	110

<b>Figura 4-16:</b> Hidrograma de caudal en la entrada y relación nivel contra tiempo aguas abajo, para la modelación 1D. La línea con cuadros representa la fecha de la imagen del 22 de octubre de 2010 y la línea con triángulos la imagen del 28 de diciembre de 2011.	111
<b>Figura 4-17:</b> Resultados: (a) Imagen 28/12/2011 vs resultado de modelación 1D ( $n_c$ y $n_{II} = 0.020$ ) - medida de desempeño $F$ (Aronica) = 56.08%, (b) Imagen 28/12/2011 vs resultado de modelación 2D ( $n_c = 0.020$ , $n_{II1} = 0.028$ , $n_{II2} = 0.032$ ) - medida de desempeño $F$ (Aronica) = 56.20%, (c) Imagen 28/12/2011 vs resultado de modelación 2D ( $n_c = 0.036$ , $n_{II1} = 0.036$ , $n_{II2} = 0.036$ ) - medida de desempeño $F$ (Aronica) = 53.52%.	115
<b>Figura 4-18:</b> Sección transversal típica para los caños Renegado, Aguas Negras y Clarín. Fuente: Adaptado de (CORPAMAG-DNP-PROCIÉNAGA, 1993).	117
<b>Figura 4-19:</b> Curvas nivel vs almacenamiento en ciénagas con batimetría (costado occidental). Fuente: Elaboración propia.	117
<b>Figura 4-20:</b> a) MDT conformado con la información secundaria (representación global) y topobatimetría del cauce principal y cuerpos de agua (ciénagas más representativas). b) Representación en modelo hidrodinámico 1D (HEC RAS V4.1).	118
<b>Figura 4-21:</b> Infograma de modelación 1D (HEC-RAS V4.1) en la zona general de estudio.	120
<b>Figura 4-22:</b> Caudal de entrada Vs. niveles en la salida del área general de estudio.	121
<b>Figura 4-23:</b> Relación caudal de entrada ( <i>Calamar-Incora K7</i> ) Vs. niveles en la salida del área general de estudio.	121
<b>Figura 4-24:</b> Análisis de frecuencia de valores extremos en la estación Calamar a partir de análisis de la serie anual de excedencias (período 1940 – 2011).	122
<b>Figura 4-25:</b> Análisis de frecuencia de valores extremos en la estación Incora K7 a partir de valores medios máximos anuales (período 1972 – 2011).	123
<b>Figura 4-26:</b> Comparación resultado de inundación en el modelo 1D Vs imagen satelital sensor RapidEye 28/12/2011.	126
<b>Figura 4-27:</b> Multitemporal de imágenes en la zona de estudio.	127
<b>Figura 4-28:</b> Dinámica fluvial del río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza, zona inundable por geomorfología (elaboración propia).	128
<b>Figura 5-1:</b> Dinámica general de los flujos de agua entre el río Magdalena, las ciénagas circundantes y los caños de interconexión en la zona de estudio.	133
<b>Figura 5-2:</b> Perfil longitudinal y curva de remanso sobre el río Magdalena diciembre 21 de 2010 (fase La Niña).	134
<b>Figura 5-3:</b> Visita a la zona de estudio. Diques y estructuras de control alrededor de las ciénagas. Complejo cenagoso del Departamento del Atlántico. Sobre imagen Google Earth.	135
<b>Figura 5-4:</b> Dinámica general del flujo entre el río Magdalena y los caños Renegado (K54), Aguas negras (K39) y Clarín (K13) - Escenario fase La Niña del ENOS.	136
<b>Figura 5-5:</b> Caudales netos ( $\Delta Q = \sum Q_{entrada} - \sum Q_{salida}$ ) en la CGSM y el complejo cenagoso Pajal - Escenario fase La Niña del ENOS.	137



<b>Figura 5-6:</b> Caudales netos de intercambio en las ciénagas Buenavista, Tiogollo, San Antonio - Escenario fase La Niña del ENOS.....	138
<b>Figura 5-7:</b> Caudales netos en las ciénagas costado occidental del río Magdalena - Escenario fase La Niña del ENOS.....	139
<b>Figura 5-8:</b> Perfil longitudinal sobre el río Magdalena febrero 16 de 2010 (Fase El Niño). .....	140
<b>Figura 5-9:</b> Dinámica general del flujo entre el río Magdalena y los caños Renegado (K54), Aguas negras (K39) y Clarín (K13) - Escenario fase El Niño del ENOS.....	141
<b>Figura 5-10:</b> Caudales netos en la CGSM y el complejo cenagoso Pajara - Escenario fase El Niño del ENOS. ....	142
<b>Figura 5-11:</b> Caudales netos en las ciénagas Buenavista, Tiogollo, San Antonio - Escenario fase El Niño del ENOS.....	143
<b>Figura 5-12:</b> Caudales netos en las ciénagas costado occidental del río Magdalena - Escenario fase El Niño del ENOS.....	143
<b>Figura 5-13:</b> Volúmenes de intercambio hídrico en las ciénagas del Bajo Magdalena período JJA/2009 – DEF/2012. ....	147
<b>Figura 5-14:</b> Volúmenes de intercambio hídrico en las ciénagas del Bajo Magdalena período JJA/2009 – DEF/2012 y condiciones de frontera (entrada y salida).....	149
<b>Figura 5-15:</b> Volúmenes de intercambio hídrico en las ciénagas del Bajo Magdalena período JJA/2009 – DEF/2012 y condiciones de frontera aguas abajo aumentada 1.0 m. .....	152
<b>Figura 5-16:</b> Condiciones de frontera para escenario de inundación con períodos de ocurrencia de 1 cada 50 años y 1 cada 100 años. Condiciones de frontera (entrada y salida). ....	153
<b>Figura 5-17:</b> Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena. ....	155
<b>Figura 5-18:</b> Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, sobre imagen Google Earth. ....	156
<b>Figura 5-19:</b> Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, Nivel de agua hasta de 1.00 m en el Municipio de Suan (K100) en la margen occidental. Al costado oriental desborde de la conexión entre ciénagas San Antonio (K100) y El Piñón (K85). b) Registro fotográfico municipio de Suan (26/01/2011) en la ocurrencia de la Fase Niña del ENOS en 2011. Parte baja de la zona de estudio. Fuente: IDEHA - Gobernación del Atlántico, 2011.....	156
<b>Figura 5-20:</b> Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, Nivel de agua hasta de 1.30 m en el Municipio de El Piñón (K85) en la margen oriental. ....	157
<b>Figura 5-21:</b> Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, Nivel de agua hasta de 1.30 m en el Municipio de Salamina (K80) en la margen oriental (Departamento de Magdalena). ....	157
<b>Figura 5-22:</b> Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, riesgo de desborde aguas arriba del Municipio de Remolino (K40) en la margen oriental (Departamento de Magdalena). Ciénaga Paraíso en su máxima capacidad. ....	158
<b>Figura 5-23:</b> Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, riesgo de desborde aguas arriba del Municipio de Sitio Nuevo (K34) en la margen oriental (Departamento de Magdalena). Ciénaga Paraíso en su máxima capacidad. ....	158

<b>Figura 5-24:</b> Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, extensión del complejo cenagoso del Atlántico entre el K40 - K20 las ciénagas: Paraíso, Santo Tomás, Sabanagrande, El convento y Malambo.....	159
<b>Figura 5-25:</b> Inundación caudal Tr 50 años en el Bajo Magdalena. ....	160
<b>Figura 5-26:</b> Cota de lámina de agua en la zona de estudio. Tr 50 años.....	161
<b>Figura 6-1:</b> Salinidad intersticial (0.5 m) promedio registrada en los suelos de manglar de cinco estaciones de monitoreo durante el período 1995-2013. Las flechas rojas indican la apertura de los caños Clarín (año 1996), Aguas Negras y Renegado (año 1998). Fuente: INVEMAR (2013) .....	168
<b>Figura 6-2:</b> Delimitación propuesta para la ciénaga Malambo (K20) a partir de criterio hidráulico. Se identifican en color cian la extensión propuesta, 3.4 km a partir del río Magdalena, en color rojo la afectación en la zona con una cota de agua 6.60 m.s.n.m. Tr 50 y Tr 100 años. Predios afectados considerados dentro de la ciénaga.....	170
<b>Figura 6-3:</b> Curva de duración de caudales (CDC) estación Calamar. Fuente: Elaboración propia. ....	177
<b>Figura 6-4:</b> Curva de duración de caudales (CDC) estación Incora K7. Fuente: Elaboración propia. ....	177
<b>Figura 6-5:</b> Resultado de los intercambios hídricos para el día 16 de febrero de 2010 en la modelación matemática implementada. Período seco.....	180
<b>Figura 6-6:</b> Resultado de los intercambios hídricos para el día 21 de diciembre de 2010 en la modelación matemática implementada. Período húmedo (La Niña 1). ....	181
<b>Figura 6-7:</b> Resultado de los intercambios hídricos para el día 28 de diciembre de 2011 en la modelación matemática implementada. Período húmedo (La Niña 2). ....	182
<b>Figura 6-8:</b> Resultado mancha de inundación modelación matemática 1D (TR 100) + inundación por geomorfología Vs Zona inundación periódica IDEAM (2011-2012). ....	184
<b>Figura 6-9:</b> Resultado mancha de inundación modelación matemática 1D (TR 50) + inundación por geomorfología Vs Zona inundación periódica IDEAM (2011-2012). ....	185
<b>Figura 6-10:</b> Propuesta de delimitación de ciénagas del costado occidental a partir del criterio conjunto geomorfología y modelación matemática TR 100 años. ....	186
<b>Figura 6-11:</b> Propuesta de reingeniería de la red hidrológica en el hidrosistema Bajo Magdalena entre Calamar – Bocas de Ceniza. Inicialmente medición de niveles en ciénagas principales y caudal en cauce principal del río Magdalena, caño Renegado, caño Aguas Negras y caño Clarín.....	187

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1:</b> Relación de planchas IGAC (Esc 1: 25.000) disponibles para la zona de estudio .....	14
<b>Tabla 2-2:</b> Relación de principales imágenes satelitales utilizadas.....	16
<b>Tabla 3-1:</b> Perspectivas de modelos hidrológicos considerados potencialmente aplicables en esta investigación. ....	46
<b>Tabla 3-2:</b> Características de los modelos hidrológicos considerados potencialmente aplicables en esta investigación. ....	47
<b>Tabla 3-3:</b> Panorama de herramientas computacionales (modelación hidráulica) potencialmente aplicables en la zona de estudio.....	58
<b>Tabla 3-4:</b> Resumen de productos globales para la representación de la tierra .....	66
<b>Tabla 3-5:</b> Sistemas de Información Geográfica populares, tabla adaptada de (Bedient, Huber, et al., 2008).....	67
<b>Tabla 3-6:</b> Principales misiones y sensores para observaciones de la tierra. ....	73
<b>Tabla 4-1:</b> Principales parámetros morfométricos en las microcuencas del área de estudio (Bajo Magdalena).....	93
<b>Tabla 4-2:</b> Reporte trimestral del comportamiento de fenómeno ENOS en el período 1981 – 2011, identificando fases Niño (color rojo), Niña (color azul) y Normal (color gris). Fuente: NOAA.....	100
<b>Tabla 4-3:</b> Comparación de resultados 1D contra imagen clasificada RapidEye (28/12/2011).....	112
<b>Tabla 4-4:</b> Comparación de resultados 2D contra imagen clasificada RapidEye (28/12/2011).....	113
<b>Tabla 4-5:</b> Caudales entrantes a la zona de estudio para diferentes períodos de retorno en el río Magdalena.....	124
<b>Tabla 4-6:</b> Caudales en las cuencas del Bajo Magdalena para diferentes períodos de retorno.....	125
<b>Tabla 4-7:</b> Exigencia computacional de la modelación hidráulica implementada.....	125
<b>Tabla 5-1:</b> Resumen volúmenes de intercambio en las 31 ciénagas del área de estudio. En color rojo los volúmenes de salida de las ciénagas y viceversa en color azul. ....	145
<b>Tabla 5-2:</b> Volúmenes de intercambio trimestral en las 31 ciénagas del área de estudio. El color rojo indica la salida de volúmenes de agua de las ciénagas y el color azul la entrada de volúmenes de agua a las ciénagas.....	148

**Tabla 5-3:** Comparación de volúmenes de intercambio en la totalidad de ciénagas del  
área de estudio. Escenario modelado con datos estación Dársena Barranquilla vs datos  
de niveles aumentados hipotéticamente 1.0 m en esta misma estación..... 151

**Tabla 6-1:** Resumen de información hidrológica y climatológica recibida (IDEAM). ..... 176

# 1.Introducción

En este capítulo se detallan los antecedentes, la motivación, el alcance de la investigación desarrollada y las metodologías propuestas y seguidas para abordar la misma. Se describen primeramente las generalidades acerca de la problemática de la zona de estudio y la motivación de la investigación, al igual que una presentación general de este documento. Seguidamente, en los objetivos generales y específicos, se describe el alcance de la investigación, mientras que en la pregunta de investigación se plantea la inquietud a ser resuelta mediante el desarrollo de la tesis de investigación aquí presentada y el aporte de esta.

## 1.1 Generalidades

En marzo de 2010, el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), promulgó la "Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico" (PNGIRH) (MAVDT, 2010), que articula nuevas directrices nacionales para la planificación y la gestión de los recursos hídricos. La PNGIRH incluye objetivos generales, objetivos específicos, estrategias, metas e indicadores para la implementación, monitoreo y evaluación de la gestión efectuada. El objetivo amplio de la PNGIRH es garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficientes y eficaces, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente (MAVDT, 2010). A este respecto es importante destacar que la PNGIRH hace hincapié en el fortalecimiento de los esquemas de planificación regional, articulados a la gestión y administración de los recursos hídricos. Un componente clave de la PNGIRH es la formulación o ajuste de

Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCAs) de acuerdo con los nuevos lineamientos de política; derivado de lo anterior se cuenta con la Guía de POMCAS (MADS, 2013).

Los principales lineamientos en los cuales se basa la PNGIRH incluyen:

- La integración de la gestión del agua para todos sus usos, con el objetivo de maximizar los beneficios globales y reducir los conflictos entre los usuarios.
- La integración en la gestión de intereses económicos, sociales y ambientales, tanto de los usuarios directos del agua como de la sociedad en su conjunto.
- La integración de la gestión de todos los aspectos del agua (cantidad, calidad y tiempo de ocurrencia) que tengan influencia en sus usos y usuarios.
- La integración de la gestión de las diferentes fases del ciclo hidrológico.
- La integración de la gestión a nivel de cuencas, acuíferos o sistemas hídricos interconectados.
- La integración de la gestión del agua y de la gestión de la tierra y otros recursos naturales y ecosistemas relacionados.

La PNGIRH reconoce que existe baja capacidad técnica en el ámbito municipal en gestión del riesgo y manejo integral del recurso hídrico y de esta forma, parte de las acciones se orientan al apoyo técnico a los municipios en el desarrollo de planes de mitigación. En las directrices para el cumplimiento de este objetivo, la política en cuanto al riesgo prevé *“Generación y divulgación de información y conocimiento sobre riesgos que afecten la oferta y disponibilidad hídrica”*, siendo una línea de acción *“Generar conocimiento sobre riesgos asociados al recurso hídrico, mediante acciones de identificación y caracterización de la vulnerabilidad de los ecosistemas clave para la regulación hídrica”*, mientras que para el fortalecimiento institucional la estrategia busca fomentar y desarrollar acciones de investigación y de manejo para la información relacionada con el recurso hídrico (MAVDT, 2010). La Guía de POMCAs (MADS, 2013), incluye entre otros aspectos los análisis de riesgo por inundación, y sin lugar a dudas, el conocimiento generado en esta tesis sobre el hidrosistema objeto de estudio apoyará en este y otros aspectos la gestión del mismo..

Para lograr la implementación de la nueva PNGIRH, el Gobierno Holandés, a través de la Embajada de Holanda en Bogotá y del Convenio de la Alianza por el Agua, impulso entre los años 2012-2015 el desarrollo de un proyecto piloto de implementación de la PNGIRH,

originalmente en cuatro cuencas prioritarias, a través de financiación al MAVDT (ahora MADS<sup>1</sup>). El objetivo general de este proyecto piloto fue el de acompañar la formulación de POMCAs, de acuerdo con la nueva Guía en dos cuencas en el país, ajustar POMCAs existentes para otras dos cuencas, y poner en práctica y evaluación algunas de las medidas específicas de gestión y reglamentación del recurso hídrico en estas mismas cuencas, de acuerdo con el nuevo marco regulador. Las lecciones aprendidas durante el proyecto piloto se planeaba contribuirían a hacer más expedito, eficiente y claro el proceso en otras cuencas del país, tal como ocurre en la actualidad con cerca de 230 nuevos POMCAs que el MADS-Fondo de Adaptación están ejecutando en el país.

En mayo de 2010, la Embajada de Holanda en Colombia, invitó a UNESCO-IHE para aportar y comentar sobre el borrador inicial del proyecto piloto planificado. Un esquema de diálogo se inició entre el actual MADS, la Embajada, y el Instituto UNESCO-IHE, y el resultado fue la formulación de un proyecto paralelo al proyecto piloto, con recursos adicionales provenientes de Holanda, liderado por UNESCO-IHE y con colaboración de la Universidad del Valle - CINARA y la Universidad Nacional – Bogotá, de acompañamiento técnico y actividades de investigación para fortalecer los resultados del proyecto piloto de POMCAs.

Esta tesis, hace parte del componente de investigación del proyecto de acompañamiento liderado por UNESCO – IHE y responde a la necesidad e importancia de mejorar el entendimiento del comportamiento hidrológico e hidráulico regional del sistema cenagoso ubicado en la parte baja del río Magdalena y que es de vital importancia, no solo para las actividades de la región, sino como zona de amortiguamiento, con ecosistemas específicos asociados. Este sistema cenagoso fue designado en 1998 dentro del convenio **Ramsar**, o convención relativa a los humedales de importancia internacional y hace parte de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) en el costado occidental y de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG) en el costado oriental.

---

<sup>1</sup> (MADS), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible antes (MAVDT), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

El río Magdalena se ha dividido en los sectores geográficos, alto, medio y bajo, para su caracterización. La parte baja, que es objeto del trabajo aquí reportado, va desde la difluencia del Canal del Dique (municipio de Calamar) hasta su desembocadura en el Mar Caribe (municipio de Barranquilla), en una longitud de aproximadamente 100 km y con un área del orden de 8,000 km<sup>2</sup> (incluyendo la Ciénaga Grande de Santa Marta y sus afluentes desde la Sierra Nevada de Santa Marta). Esta área constituye una zona plana, poco pendiente e inundable, con un complejo sistema de ríos y humedales y de interacciones entre ellos. La planicie de inundación del Magdalena apoya diversos tipos de ecosistemas asociados a la formación de humedales o ciénagas con espejos de agua o no<sup>2</sup>; también da sustento a las áreas agrícolas y pobladas, así como a importantes actividades económicas en la región. El proyecto piloto de ajuste del POMCA, de acuerdo con la nueva PNGIRH (realizado por la Universidad del Magdalena) se centró en las cuencas locales y en los humedales ubicados sobre la orilla occidental del río Magdalena en el Departamento del Atlántico, justo aguas arriba de la ciudad de Barranquilla (U. del Magdalena, 2011); mientras que, a escala regional, en esta tesis, el costado oriental es también el objeto de estudio, debido a las conexiones existentes entre el río Magdalena y la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) (ver Figura 1-1).

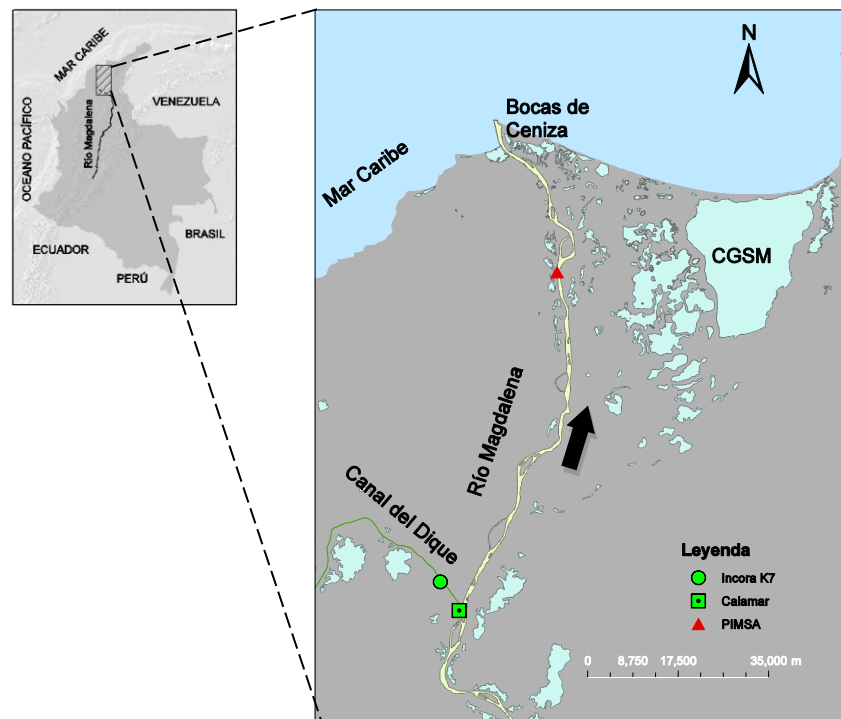
El conocimiento a nivel regional de esta zona baja, en términos de los componentes hidrológico e hidráulico, parcialmente hace parte de los estudios de ajuste del POMCA, desarrollados por la Universidad del Magdalena, pero indudablemente se constituye en un insumo muy importante para apoyar la toma de decisiones. Debe reconocerse adicionalmente la limitada información básica existente en el área de estudio y la necesidad de complementarla con otras fuentes de información, como productos multitemporales de sensores remotos, entre otros. Generar conocimiento sobre la dinámica interanual e intra-anual de los intercambios río – ciénagas, que sirva de soporte a la toma de decisiones en

---

<sup>2</sup> Los ecosistemas con espejos de agua permanente están asociados a los ciclos biológicos de los peces, aves migratorias, actividades de subsistencia y turismo de diferentes grupos sociales. Los segundos, que no tienen espejo de agua permanente, son importantes por el tipo de vegetación en donde prevalecen plantas herbáceas y en donde igualmente interrelaciona una fauna típica (aves, insectos, reptiles y otros) (UNAL, 2004). Además de la pesca existe una gran cantidad de especies vegetales acuáticas, de pantano y terrestres (CORMAGDALENA, 2007). Existe gran cantidad de especies vegetales características del espejo de agua como la lechuga de agua, la taruya o batata de agua y la hoja de raya. En las zonas próximas al litoral las ciénagas están acompañadas de manglar.



cuanto al establecimiento de zonas de inundación y delimitación de rondas hídricas, apoyo al estudio de la calidad de agua y al estudio de la preservación de los ecosistemas del complejo cenagoso, entre otros, se consideran los aportes fundamentales de esta investigación.



**Figura 1-1:** Localización general de la zona de estudio

## 1.2 Objetivo general

Aportar al entendimiento, a escala regional, del comportamiento hidrológico e hidráulico del complejo cenagoso del Bajo Magdalena, investigando la dinámica interanual e intra-anual de los intercambios hídricos río-ciénagas.

## 1.3 Objetivos específicos

- Consolidar en la zona de estudio, y con ayuda de una herramienta SIG, una base de datos de información primaria y secundaria, complementada con información

proveniente de sensores remotos, referente a aspectos de topografía, hidroclimatología, suelos y cobertura vegetal.

- Efectuar la caracterización hidroclimatológica, hidráulica y geomorfológica de la zona de estudio, a partir de la base de datos consolidada.
- Proponer un protocolo a escala regional de modelación acoplada hidrología-hidráulica, de hidrosistemas naturales complejos con información escasa e implementarlo satisfactoriamente en la zona de estudio.
- Apoyar, a través de la modelación matemática efectuada, la definición de mapas de inundación y zonas de preservación hídrica, que refuercen la gestión adelantada por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA), en prevención y manejo del riesgo por inundación en su jurisdicción, constituyéndose en insumo adicional dentro de los estudios de ajuste del POMCA en la zona, desarrollados por la Universidad del Magdalena.

## 1.4 Pregunta de investigación

¿Cuál es el método más adecuado que permite a nivel regional estimar intercambios –río-ciénaga en una zona baja con información limitada y cómo esta metodología puede apoyar la definición de rondas hídricas en un complejo cenagoso de escala regional?

## 1.5 Organización del documento

Descritos los antecedentes, motivaciones y objetivos para la realización de esta investigación, se presenta a continuación la organización general del documento. En el Capítulo 2, se realiza una descripción detallada de la zona de estudio resaltando la importancia medio ambiental y estratégica de la zona de ciénagas, entre otros aspectos; además, se detalla la información existente disponible a la cual se tuvo acceso, se discute sobre el problema de la información escasa en el país y cómo esta dificultad fue abordada en la investigación. También se analiza la respuesta de la zona de estudio ante la

ocurrencia del fenómeno macroclimático ENOS<sup>3</sup> y sus dos fases: La Niña y el Niño. En el Capítulo 3, se describe el estado del arte y las características de los modelos matemáticos hidrológicos e hidráulicos existentes y que se consideran aplicables en la zona de estudio, además, se especifica la importancia de las fuentes de información secundarias a partir de sensores remotos y Sistemas de información Geográfica (SIG) y cómo estas apoyan notablemente la investigación de los recursos hidráulicos; seguidamente se discute el papel de la geomorfología y más específicamente de la dinámica fluvial en la delimitación de zonas susceptibles a inundación y se particulariza la metodología utilizada para el estudio, destacando el desarrollo de una propuesta metodológica para la calibración de modelos matemáticos en hidráulica a partir de la información aportada por sensores remotos, entre otros aspectos. En el Capítulo 4, se presenta la aplicación de la metodología discutida en el Capítulo 3, enfatizando en la hidrología, la hidráulica y la dinámica fluvial de la zona de estudio. Mientras que el resultado de los intercambios hídricos río Magdalena – ciénagas se presenta y discute en el Capítulo 5 a través de distintos escenarios de análisis, un año normal, año Niño y año Niña. En este Capítulo 5, se presentan también los resultados de las zonas susceptibles a inundación, aplicando los criterios geomorfológicos e hidráulicos descritos en el Capítulo 3. Finalmente, en el Capítulo 6 de esta investigación se incluyen las conclusiones generales y específicas, además de las recomendaciones a las diferentes entidades del orden local y nacional que tienen injerencia directa o no, en la zona de estudio (el Bajo Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza) y cómo a través de nuevas investigaciones en la zona se pueden complementar los resultados aquí reportados, para tener cada día mejores herramientas de gestión de hidrosistemas complejos, como el analizado en esta investigación.

---

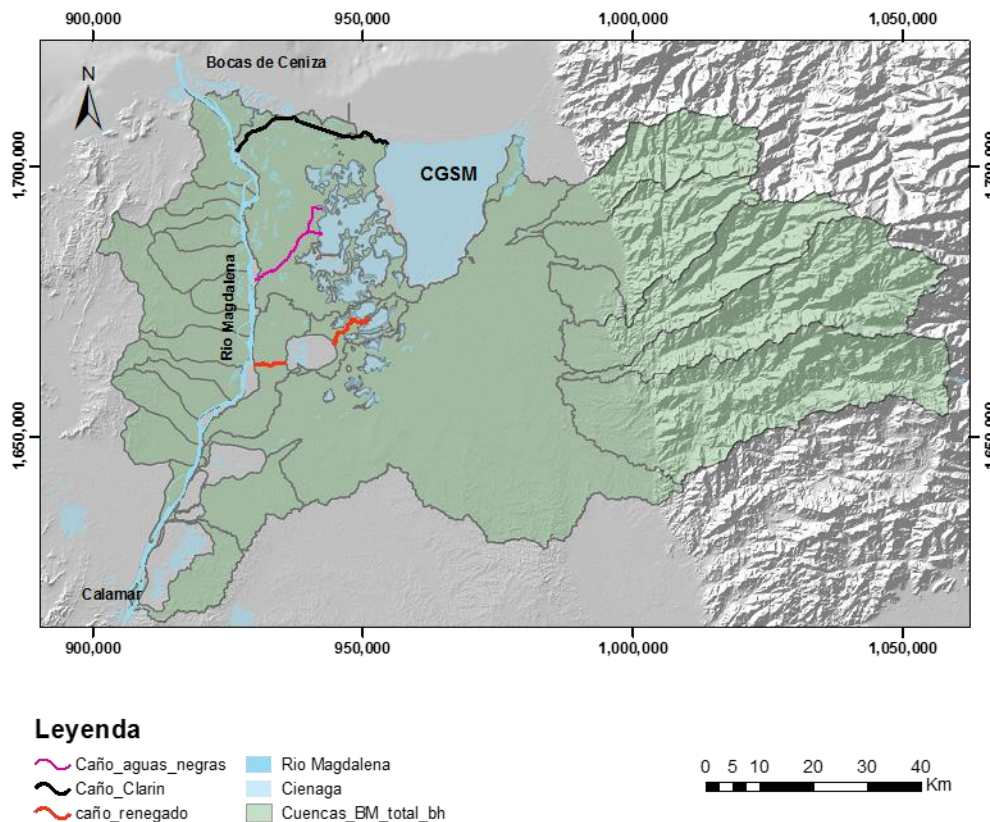
<sup>3</sup> ENOS: El Niño Oscilación del Sur.



## 2.El Bajo Magdalena

En este Capítulo se describe la zona de estudio, que corresponde al Bajo Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza, sus características socioeconómicas principales y la problemática existente con relación a las inundaciones. Además, se detalla la información primaria y secundaria que fue posible conseguir de la zona; información principalmente de tipo cartográfico, climatológico, hidrológico y geomorfológico.

El río Magdalena es quizás la fuente hídrica más importante del país y comúnmente suele dividirse en tres grandes regiones con características geomorfológicas, hidrológicas e hidráulica distintas; en la zona del Alto Magdalena el río nace a 3.865 msnm en el páramo de las Papas y finaliza en el Municipio de Honda (Tolima), en donde comienza el Magdalena Medio que se extiende hasta el Municipio del Banco. A partir de este municipio, en el Departamento del Magdalena y hasta Bocas de Ceniza (Departamento del Atlántico) el cauce se conoce como el Bajo Magdalena. En este último tramo el río desciende aproximadamente 33 m en una longitud de 400 km, con un área de drenaje aproximada de 105.250 km<sup>2</sup> y un caudal promedio de 7100 m<sup>3</sup>/s a la altura del municipio de Calamar (Bolívar) (CORMAGDALENA, 2007). Dentro del Bajo Magdalena se encuentra enmarcada el área particular de estudio de esta investigación, la cual inicia en cercanías del municipio de Calamar, inmediatamente aguas abajo de la derivación del Canal del Dique, en donde se deriva cerca del 7.5% de los caudales que transporta el río Magdalena a esta altura (CORMAGDALENA-UNAL, 2007) y finaliza al norte, en Bocas de Ceniza en Barranquilla, en donde se encuentra la desembocadura del río Magdalena en el Mar Caribe (ver Figura 2-1). Al costado occidental la zona de estudio limita con el Departamento del Atlántico, donde se encuentra la zona de humedales del río Magdalena, la cual tiene una superficie aproximada de 124,676 Ha y se encuentra subdividida en trece subcuencas que drenan sus aguas al río Magdalena (U. del Magdalena, 2011). Ver Figura 2-1.



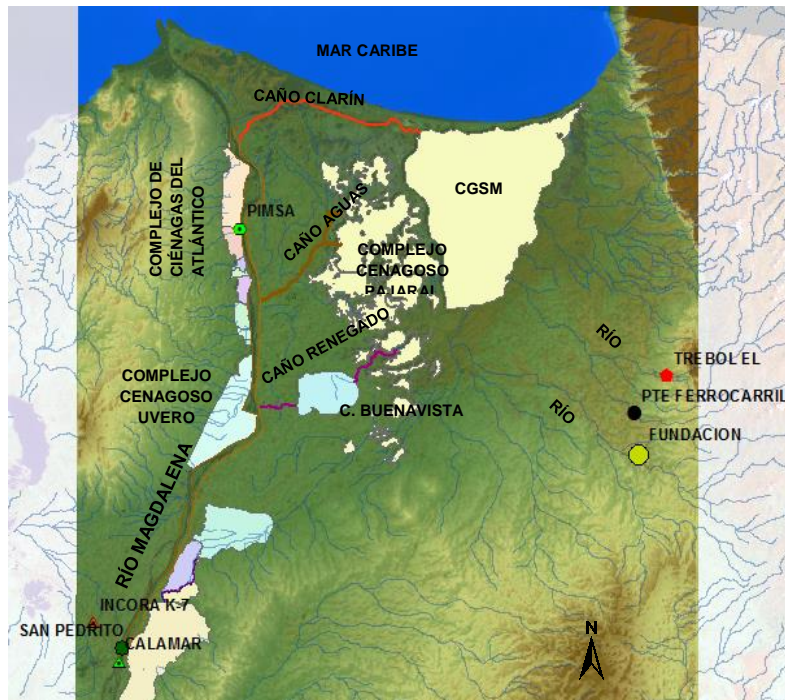
**Figura 2-1:** Áreas de drenaje aferentes al río Magdalena en los costados oriental y occidental de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

De otra parte, el límite oriental de la zona de estudio, como se aprecia en la Figura 2-1, lo constituye una vasta zona de descanso del río Magdalena. Esta es una zona muy compleja en donde se encuentran múltiples madrevejas o meandros abandonados que han formado ciénagas, algunas de las cuales se encuentran interconectadas entre sí o con el río Magdalena. Debido a esta característica, el costado occidental del área de estudio resultó ser la franja más compleja para establecer los límites de la zona de investigación asociada con el río Magdalena. Sin embargo, después de varias visitas técnicas y visitas de campo a la región (Barranquilla y Santa Marta), revisión de distintos documentos e informes técnicos de proyectos elaborados en esta área por entidades como INVEMAR, CORPAMAG, distintas Universidades e investigadores tales como: (Díaz-Granados, Camacho, et al., 1996; CORMAGDALENA-UNINORTE, 2007), etc., se pudo verificar que

existen varios caños de derivación del río Magdalena, que lo conectan con la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), ver Figura 2-2, y por tanto el área de estudio debe incluir esta última. Por su tamaño, son tres los caños más representativos: a) Caño Renegado, ubicado aproximadamente en el K54 del río Magdalena, en las inmediaciones del corregimiento del Guaimaro (Magdalena), tiene una longitud aproximada de 6 km hasta la ciénaga Buenavista. b) Caño Aguas Negras, ubicado aproximadamente en el K39 del río Magdalena, entre los municipios de Remolino y Sitionuevo (Magdalena), tiene una longitud aproximada de 18.6 km en el brazo más largo que llega al complejo cenagoso Pajara. c) Caño Clarín, es la derivación más aguas abajo de todos los caños, se encuentra ubicado aproximadamente en el K13 del río Magdalena, aguas abajo del Puente Pumarejo que cruza el río Magdalena para unir los departamentos del Magdalena y Atlántico; tiene una longitud de 33 km hasta la CGSM. Cabe resaltar que el cero en el abscisado del río Magdalena se encuentra en la desembocadura de éste en el Mar Caribe.

Estas conexiones antrópicas, fueron creadas entre los años 80 y 90 con varios objetivos, entre ellos, llegar con agua dulce a la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) y así evitar la salinización de este hidrosistema y la amenaza a los ecosistemas naturales de la CGSM, además de servir al riego de fincas y otros. (Albarracín et.al, 1995; Múnera et al., 2005). Lo anterior, obligó lógicamente a considerar un área mayor como área de estudio en comparación con la inicialmente planteada en la propuesta de investigación, para incluir la CGSM y los aportes principales que a ésta llegan desde la Sierra Nevada de Santa Marta, a través de los ríos Fundación y Aracataca principalmente, con el propósito de representar lo mejor posible los intercambios hídricos de todo el hidrosistema.

La Figura 2-2 muestra la zona de estudio y sus principales componentes, destacando en el departamento del Atlántico (costado occidental) el complejo cenagoso Uvero y el complejo cenagoso del Atlántico, este último con cerca de seis ciénagas: El Paraíso, Luisa, Manatí, Santo Tomás, Sabanagrande y El Convento (CRA, 2007); mientras que en el departamento del Magdalena (costado oriental) se encuentran el complejo cenagoso Pajara, la CGSM, la ciénaga Buenavista y la ciénaga San Antonio entre otras, los ríos Fundación, Aracataca y los caños antes mencionados.



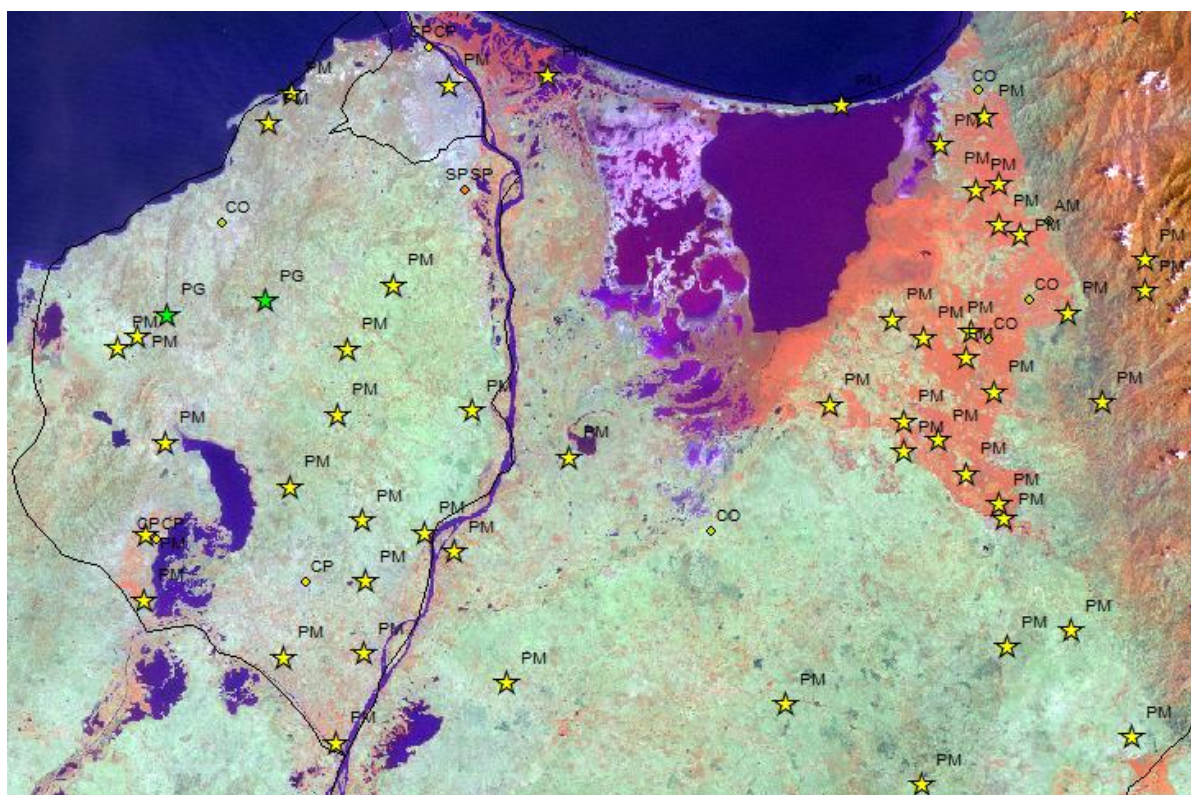
**Figura 2-2:** Zona de estudio y sus principales componentes (ríos y ciénagas) en el Bajo Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza. Se localizan aquí las principales estaciones hidrológicas del hidrosistema. Fuente: Elaboración propia.

## 2.1 Resumen de la información primaria y secundaria disponible y recolectada en la zona de estudio.

En la zona de estudio, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), cuenta con 47 estaciones climatológicas con registros de diferentes variables climatológicas, incluyendo datos de precipitación, temperatura, evaporación, brillo solar, viento, radiación y humedad relativa. Igualmente, el IDEAM cuenta con datos de seis estaciones hidrológicas ubicadas en el área de estudio, distribuidas así: dos sobre el río Magdalena, una en el Canal del Dique, una sobre el río Fundación y dos sobre el río Aracataca, estos últimos en el departamento del Magdalena (ver Figura 2-2). A través del



convenio interadministrativo entre la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) y el IDEAM, este último suministró la información hidroclimatológica de estas estaciones, con datos a resolución temporal diaria y mensual. La distribución espacial de las estaciones climatológicas en la zona de estudio se presenta en la Figura 2-3, donde se aprecia una importante densidad de estaciones en el costado oriental, en el pie de la Sierra Nevada de Santa Marta, pero un déficit de estaciones en la zona central, más próxima a las ciénagas; en el anexo 1 se listan en detalle las variables principales registradas y recibidas de cada una de las estaciones, periodos de la información, etc. Con esta información se realiza la caracterización climatológica de la zona de estudio, la cual se detalla más adelante; además, una vez analizada en su totalidad esta información, esta es un importante insumo para realizar el estudio hidrológico e hidráulico descrito en esta investigación.



**Figura 2-3:** Localización de 61 estaciones climatológicas en la zona de estudio

Sumado a la información primaria de climatología e hidrología, suministrada por el IDEAM para la zona de estudio, fue posible contar además con las secciones transversales del río Magdalena (únicamente cauce) en aproximadamente 80 km (entre el K20, Puente

Pumarejo y el K100, en la derivación del Canal del Dique). Esta última información fue levantada en campo por la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá para CORMAGDALENA en el año 2012 y se caracteriza por tener secciones transversales del río cada 200 metros. De otra parte, fue posible obtener la información de batimetrías realizadas en las ciénagas: Sabanagrande, Santo Tomás, El Espinal y Palmar de Varela, al costado occidental; esta información fue suministrada amablemente por la CRA<sup>4</sup> (U. del Magdalena, 2011). Se adquirió también la cartografía oficial de la zona, comprendida por planchas IGAC<sup>5</sup>, las cuales datan del año 1956 (ver Tabla 2- 2).

Las planchas IGAC son importantes como referencia inicial para los análisis de dinámica fluvial y están a escala 1:25000, mientras que el levantamiento batimétrico en la zona se utilizará para consolidar junto con información secundaria un modelo digital de terreno (MDT) que permita representar lo mejor posible la zona de estudio. Información primaria adicional no fue encontrada en la zona, a pesar de las visitas a entidades como CORPAMAG, INVEMAR, etc.

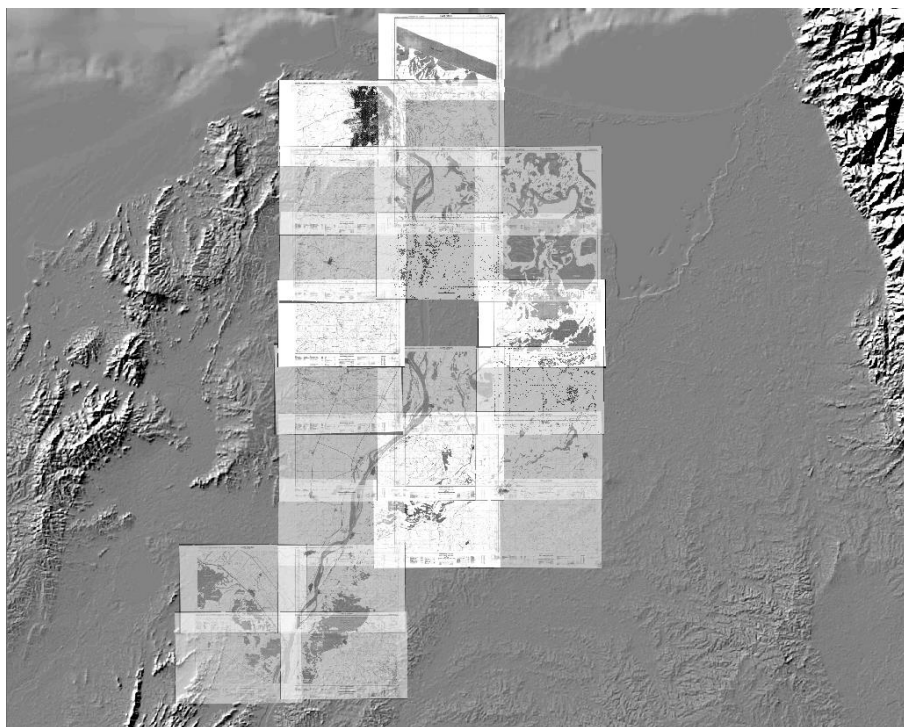
**Tabla 2-1:** Relación de planchas IGAC (Esc 1: 25.000) disponibles para la zona de estudio

PL_25000	PL_25000	PL_25000
17IIB	24IIA	25IIIA
17IIC	24IIB	25IIIC
17IID	24IIC	31IB
17IVA	24IID	31ID
17IVB	24IVA	31IIA
17IVC	24IVB	31IIC
17IVD	24IVC	
18IC	24IVD	
18IIIA	25IA	
18IIIC	25IC	

---

<sup>4</sup> Corporación Regional del Atlántico.

<sup>5</sup> Instituto Geográfico Agustín Codazzi



**Figura 2-4:** Mosaico de Planchas IGAC en la zona de estudio georreferenciadas sobre mapa de alturas sombreado.

Adicional a la información primaria antes detallada, fue posible adquirir información secundaria; esta información se compone principalmente de productos de diferentes sensores remotos, tales como: *Landsat TM*, *Landsat ETM*, *RapidEye*, *GeoEyes*, *Radarsat*, *CosmoSkymed*, *Spot*, etc. Los productos de estos sensores son imágenes satelitales que fueron suministradas por el IGAC, a través del Banco Nacional de Imágenes (BNI). Algunos de los principales productos recibidos del IGAC, sus características y su aplicación en la investigación, se describen en la Tabla 2-2.

Otra información secundaria relevante la constituyen los modelos digitales de terreno (MDT) con resolución espacial de 90m (SRTM) y 30m (AsterGDEM), los cuales son gratuitos, y descargables desde internet. Estos insumos son de particular importancia dado que permiten efectuar la delimitación del área de estudio, cuencas aferentes, establecimiento de parámetros morfométricos de cuencas, entre otras utilidades. Las características de estos productos secundarios se detallan con mayor rigurosidad en el Capítulo 3.

**Tabla 2-2:** Relación de principales imágenes satelitales utilizadas.

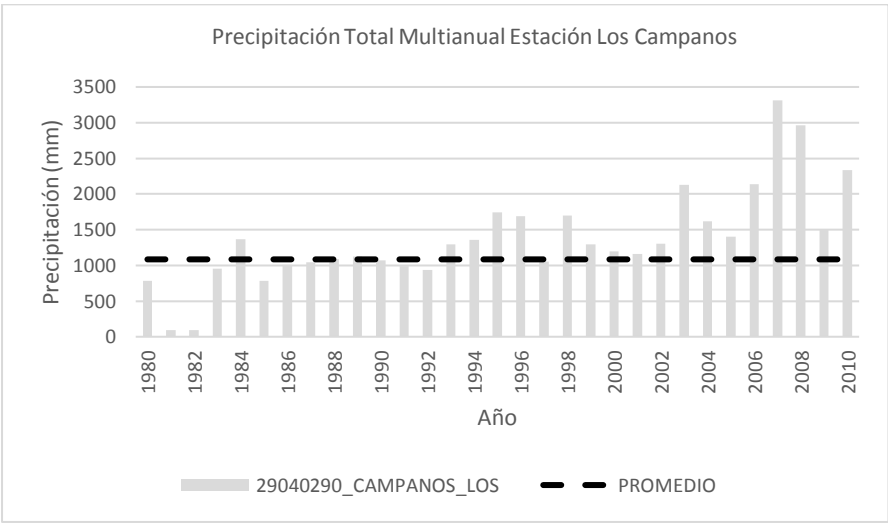
Fecha (DD/MM/AA)	Sensor	Bandas o polarización	Resolución (m)	Uso principal
22/11/2010	Radarsat 2	HH	12.5	Estimacion niveles de agua inicial
10/12/2011	Worldview 2	4-2-1	2	Verificación de coberturas
16/01/2011	Geoeyes - 1	Pancromático	4	Verificación de coberturas
23/01/2011	Radarsat 2	HH	12.5	Verificación de coberturas
02/02/2011	Radarsat 2	HH	12.5	Verificación de coberturas
26/02/2011	Geoeyes - 1	Pancromático	4	Verificación de coberturas
28/12/2011	RapidEye	Pancromático	7	Calibración modelos hidráulicos
01/12/2002	Landsat ETM	1-2-3-4-5-7	30	Dinámica fluvial
01/12/1998	Landsat ETM	1-2-3-4-5-7	30	Dinámica fluvial
02/12/1996	Landsat ETM	1-2-3-4-5-7	30	Dinámica fluvial
03/12/1984	Landsat TM	1-2-3-4	30	Dinámica fluvial

## 2.2 Climatología y geomorfología en la zona de estudio

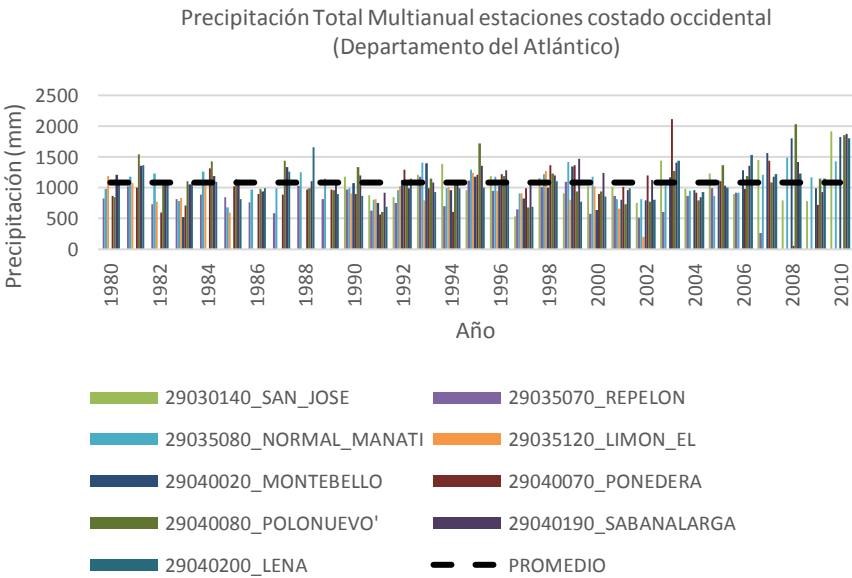
### 2.2.1 Climatología

Como fue mencionado anteriormente, la información climatológica recibida fue analizada y procesada, aplicando pruebas de homogeneidad, consistencia de información y llenado de datos faltantes en aquellas estaciones con un período de datos mínimo de 20 años, contemplando años con máximo 20% de datos faltantes; descartando las estaciones con períodos menores. De esta forma fue posible establecer cómo es la variabilidad climática de la zona de estudio y como ésta es influenciada por fenómenos macroclimáticos como ENOS en sus fases Niño y Niña. El período de análisis seleccionado se encuentra entre los años 1980 y 2010.

La precipitación y la temperatura resultan ser las variables más representativas a la hora de entender la climatología de la zona; al costado occidental, en el departamento del Atlántico, los mayores valores de precipitaciones totales anuales se presentan en la estación Los Campanos (código IDEAM 29040290), los cuales son ligeramente superiores al promedio anual de toda la franja occidental (1084 mm/año), con una muy alta variabilidad interanual, sobretodo más recientemente, registrando valores máximos cercanos a los 3400 mm, para el año 2007. Ver Figura 2-5 y Figura 2-6.



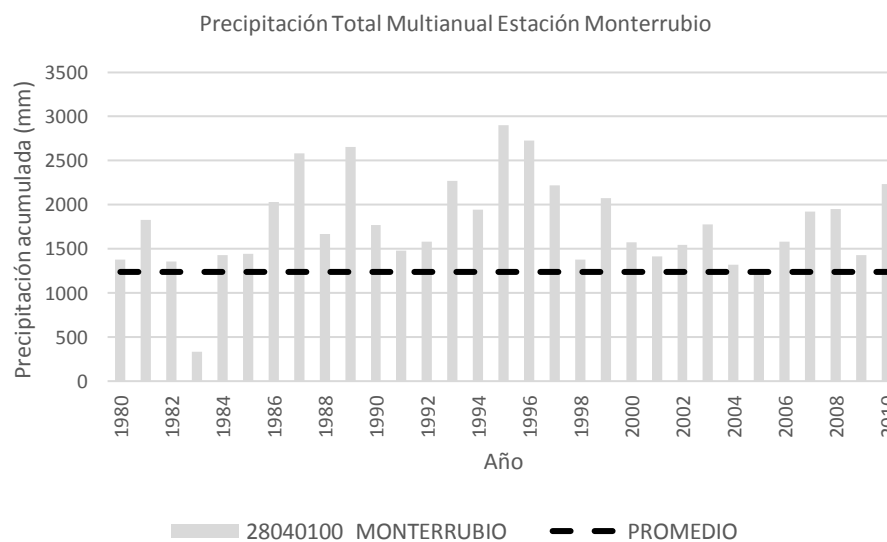
**Figura 2-5:** Precipitación total multianual estación Los Campanos departamento del Atlántico.



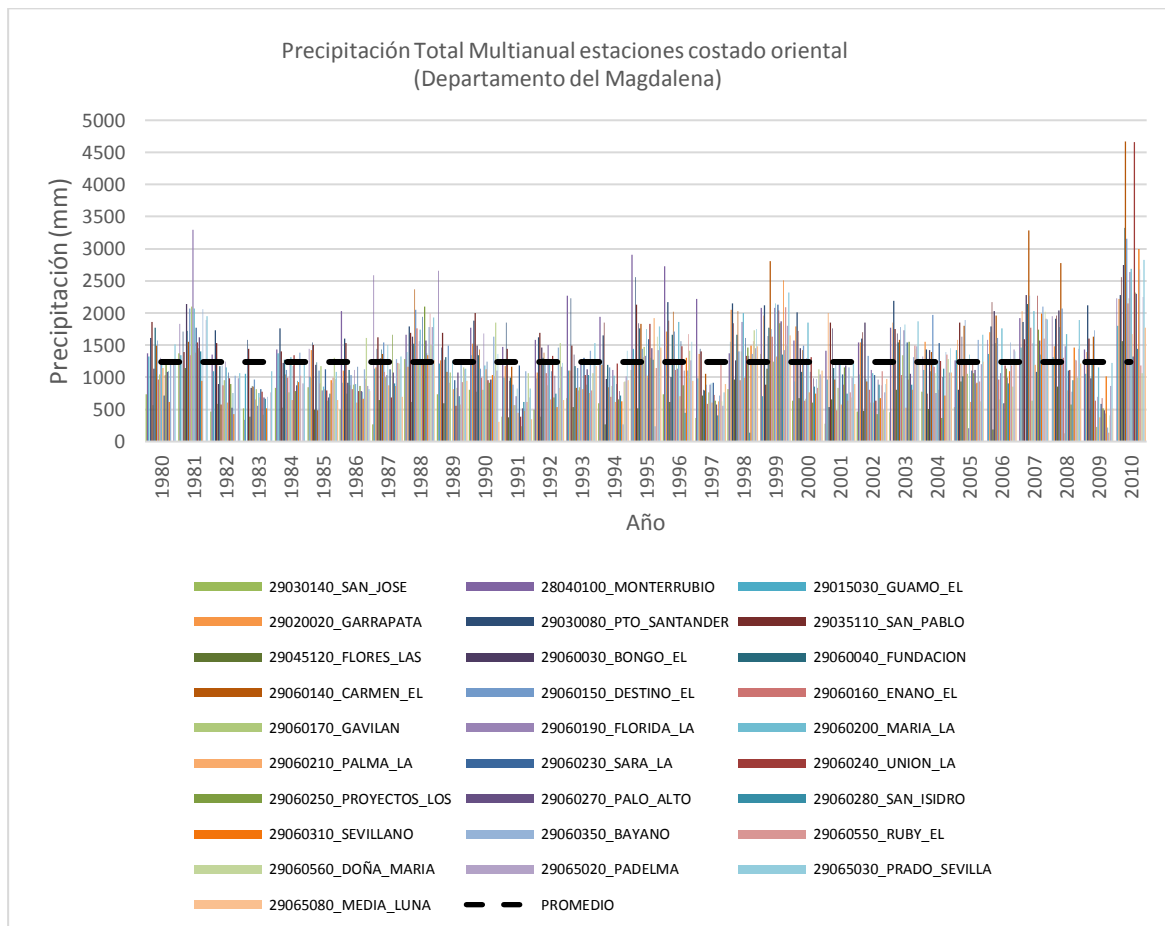
**Figura 2-6:** Precipitación total multianual para nueve estaciones ubicadas en el costado occidental departamento del Atlántico.

Hacia el costado oriental, departamento del Magdalena, la estación con mayor registro de precipitación total anual es la Estación Monterrubio, con un valor máximo cercano a los 2300 mm/año, registrado para el año 2010, mientras que la precipitación total media de esta zona (costado oriental) se estima en 1238 mm/año, sin considerar los aportes

provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta (ver Figura 2-7 y Figura 2-8). Se aprecia que la precipitación media anual en ambos costados del río Magdalena, sin contar la Sierra Nevada (SN), es similar, con un promedio de 1150 mm/año y se destaca que se tiene una máxima altura sobre el nivel del mar aproximada de 100 msnm, siendo la Sierra Nevada (SN) un caso especial en el Bajo Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza, ya que corresponde a una altura máxima de 5678 msnm y cuya climatología se puede considerar diferente a la del resto de la zona de estudio por sus distintos pisos térmicos, vegetación, etc. Según (Mesa, 1997), la precipitación media en la SN es del orden de 1500 mm/año y cae principalmente de mayo a octubre con dos máximos separados en mayo - junio y septiembre-octubre; superior al promedio de 1150 mm/año estimado en esta investigación para la zona baja sin contar la SN.



**Figura 2-7:** Precipitación total multianual estación Monterrubio departamento del Magdalena.



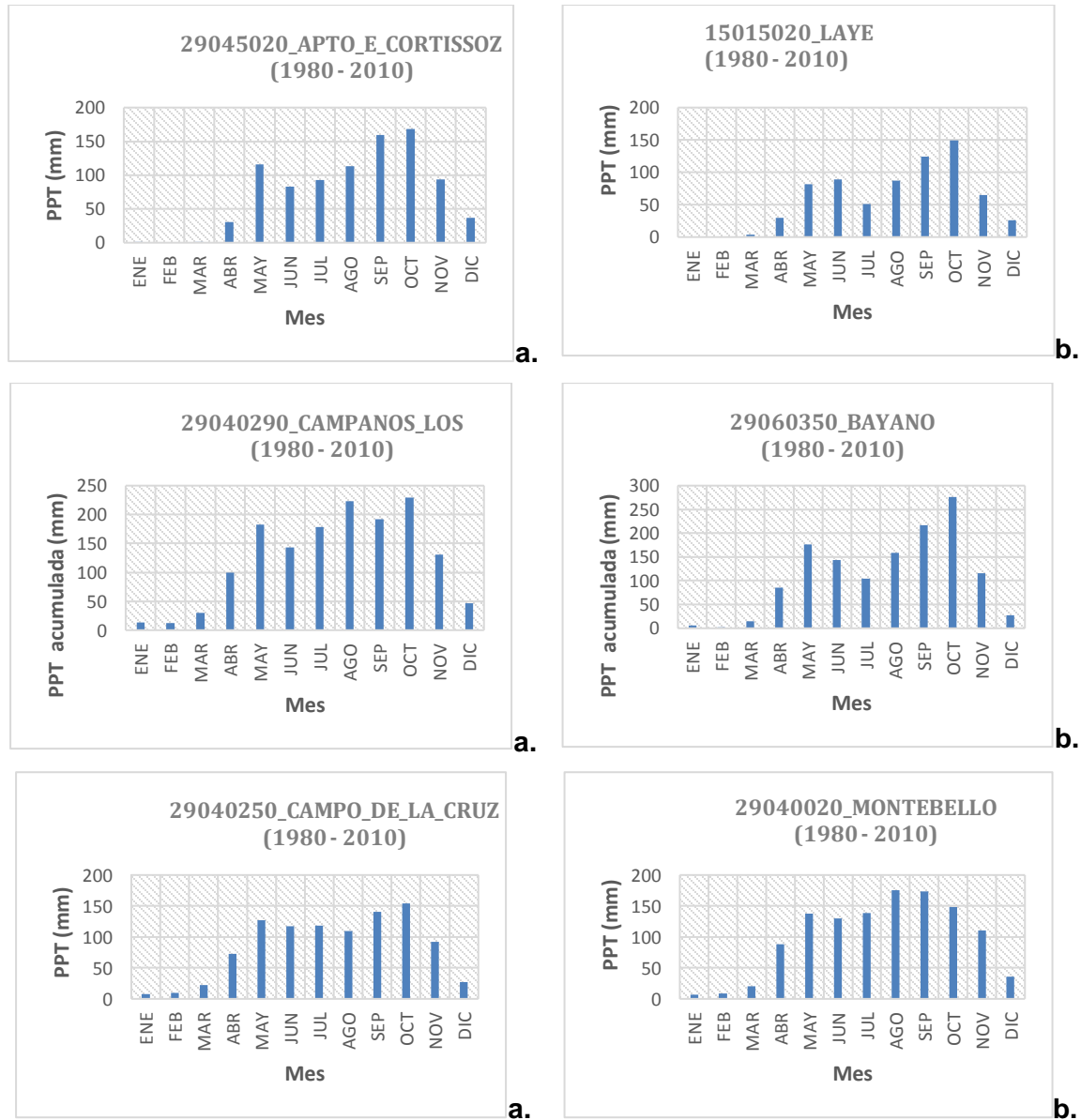
**Figura 2-8:** Precipitación total multianual 28 estaciones costado oriental departamento del Magdalena.

En la Figura 2-8 se aprecia que los valores máximos de precipitación son reportados en el año 2010, coincidentes con la época de marcadas inundaciones. Se reportan valores excepcionalmente muy por encima del promedio en la estación La Unión (cód. IDEAM 29060240) cerca de la CGSM, la cual, solo para el mes de octubre de 2010 reportó una precipitación mensual de 1209 mm/mes, similar al promedio anual de la zona.

Del análisis mensual multianual de la precipitación en la zona de estudio se puede destacar un comportamiento monomodal entre los meses de mayo a diciembre, en ambas franjas de la zona de estudio, con picos entre mayo-junio y septiembre-octubre, similar a lo reportado por (Mesa, 1997). El trimestre de mayores precipitaciones está comprendido por los meses de julio, agosto y septiembre (JAS), con un valor medio multianual de



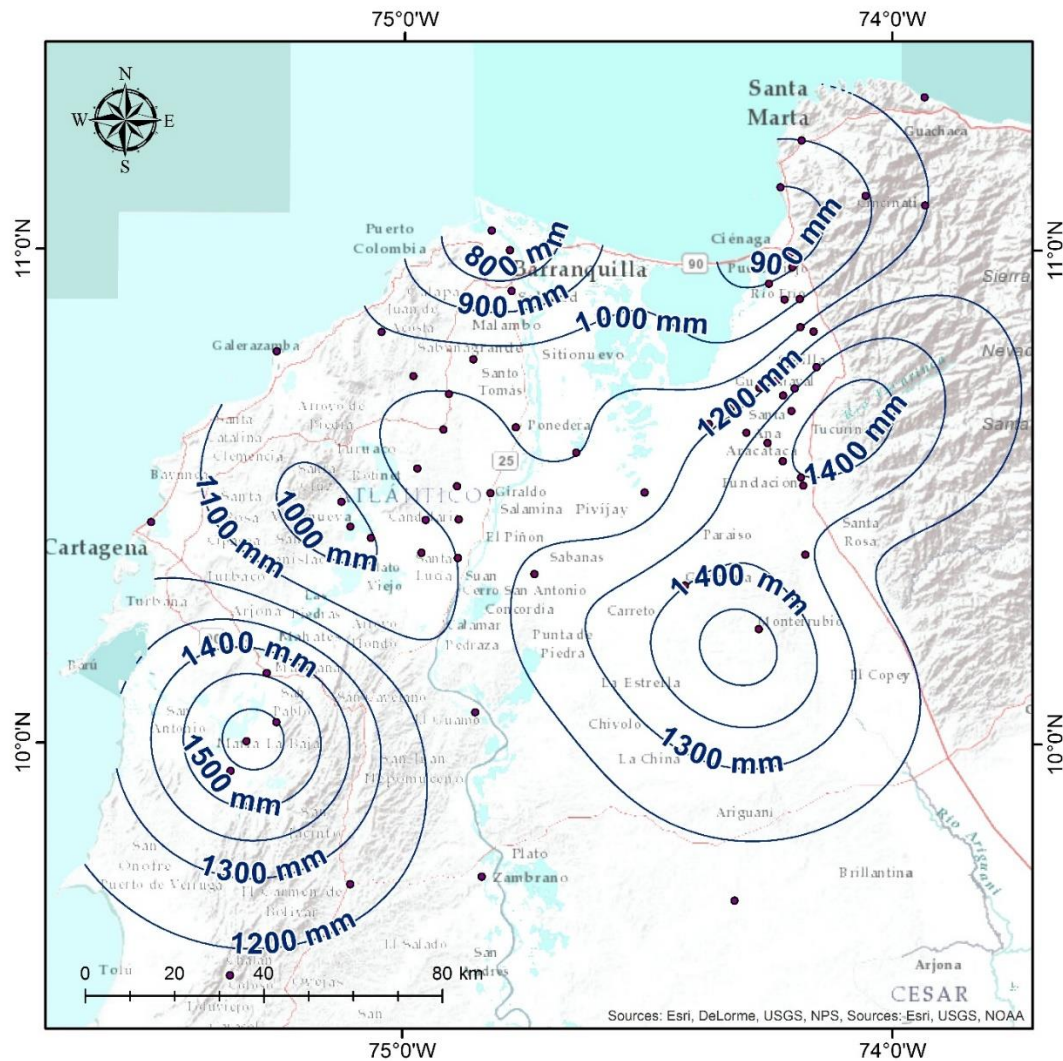
448 mm/trimestre, cerca del 37% del total de precipitación anual en la zona; mientras que los menores valores de precipitación se presentan los primeros meses del año, en el trimestre enero, febrero y marzo (EFM), con un valor medio de 36 mm/trimestre, solo el 3% de la precipitación anual.



**Figura 2-9:** Precipitación promedio mensual multianual en estaciones representativas del norte, centro y sur del área de estudio. a) Costado Oriental y b) Costado Occidental. Fuente: Elaboración propia.

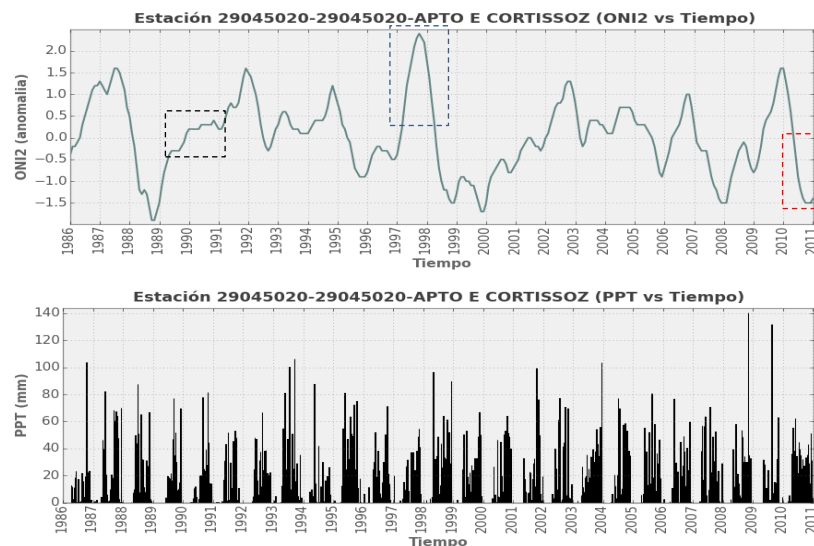


En la Figura 2-9 se aprecia el comportamiento regional de la precipitación promedio anual (PPT) en el período de análisis 1980 – 2010, evidenciando el segundo semestre del año como el más lluvioso de la zona. Mientras que las isoyetas de precipitación promedio anual multianual presentadas en la Figura 2-10 resumen el análisis realizado a la variable precipitación en la zona de estudio.



**Figura 2-10:** Isoyetas de precipitación anual multianual en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

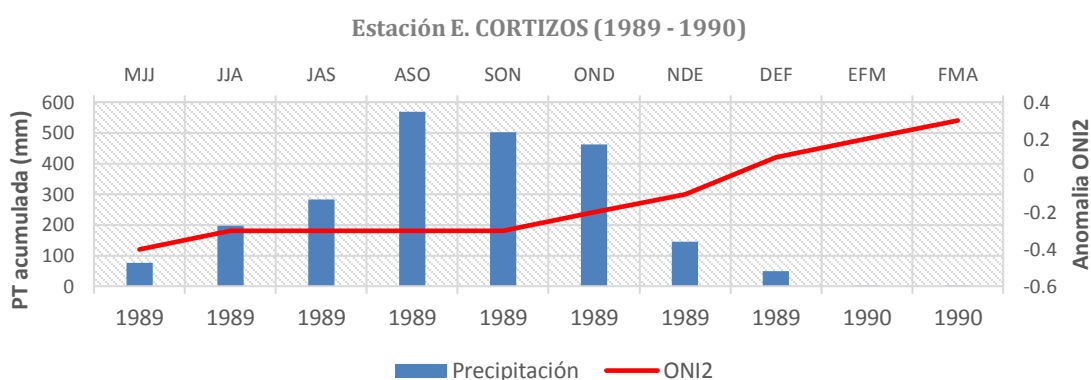
Una comparación entre la precipitación y el índice *ONI2*<sup>6</sup> (por sus siglas en inglés) particulariza cómo esta variable se ve notablemente afectada por la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos como el ENOS, en sus fases Niño y Niña. Se tomó como referencia la estación Ernesto Cortissoz ubicada en el área metropolitana de la ciudad de Barranquilla, que hace parte del área de estudio y se compararon los valores de precipitación acumulada trimestralmente versus el índice ONI2. Se realiza la comparación inicialmente para la totalidad de la serie de datos en el período (1986 – 2011), Figura 2-11, luego se efectuó una comparación para un año normal (1989 -1990), Figura 2-12, año Niño (1997 - 1998), Figura 2-13, y año Niña (2010 – 2011), Figura 2-14; los resultados para las distintas fases se presentan a continuación y pueden ser considerados representativos, en orden de magnitud, para toda la zona de estudio, debido a la enorme correlación existente en el comportamiento de esta variable en ambos costados del río, como fue discutido anteriormente.



**Figura 2-11:** Precipitación total en la estación Ernesto Cortissoz (1986 – 2011) Vs. anomalía ONI2. (fase neutra). Fuente: Elaboración propia.

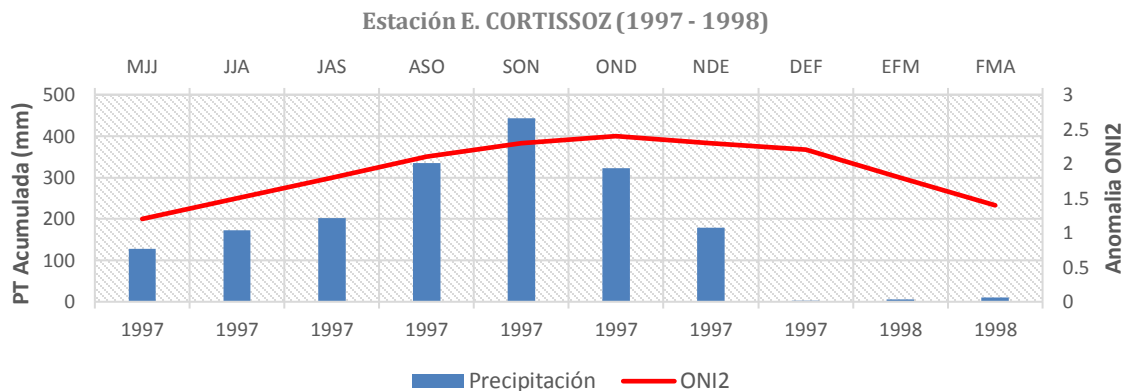
<sup>6</sup> ONI2: Índice Oceánico del Niño – Corrección 2012. Valores menores a -0.5 °C indican fenómeno de la Niña y valores mayores 0.5 °C indican fenómeno del Niño. Promedio de temperatura en el Océano Pacífico.

- Fase Neutra: Ver Figura 2-11, donde se detallan los valores de referencia o normales en la estación, registrando un máximo de precipitación acumulada en el trimestre, agosto, septiembre, octubre, (ASO), con un valor cercano a los 570 mm/trimestre, mientras que el trimestre con menores precipitaciones es enero, febrero, marzo, (EFM), con valores cercanos a 2 mm/ trimestre, es decir, precipitaciones nulas teniendo en cuenta la precisión de los aparatos de medida, en su gran mayoría pluviómetros.



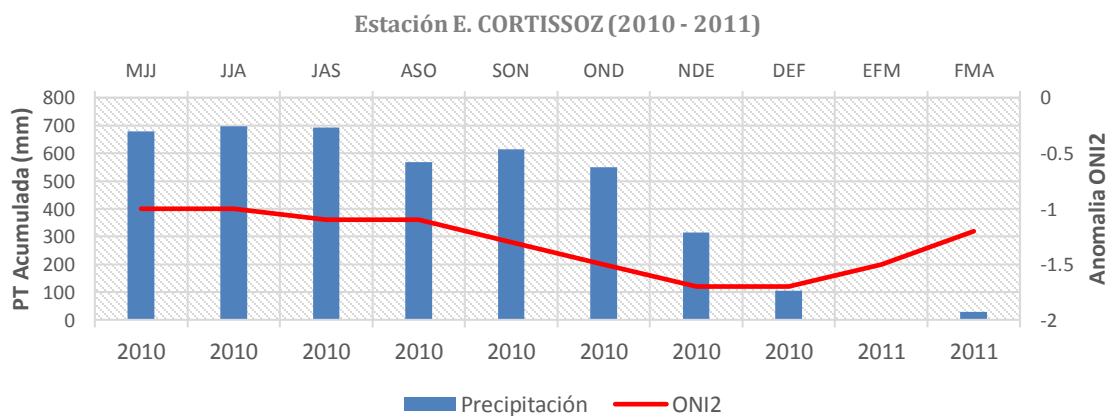
**Figura 2-12:** Precipitación mensual acumulada (trimestral) en la estación Ernesto Cortissoz (1989 – 1990) Vs. anomalía ONI2. (fase neutra). Fuente: Elaboración propia.

- Fase El Niño: Ante la ocurrencia del fenómeno El Niño en la zona de estudio, la Figura 2-13, sugiere una correlación entre este fenómeno y la disminución de lluvias en comparación con el año neutro de la figura inmediatamente anterior, siendo las lluvias de los trimestres ASO y DEF, aquellas en donde estas reducciones son superiores, llegando en el año mostrado (1997 - 1998) a ser del 41% y 100% respectivamente.



**Figura 2-13:** Precipitación mensual acumulada (trimestral) en la estación Ernesto Cortissoz (1997 – 1998) Vs. anomalía ONI2. (fenómeno El Niño). Fuente: Elaboración propia.

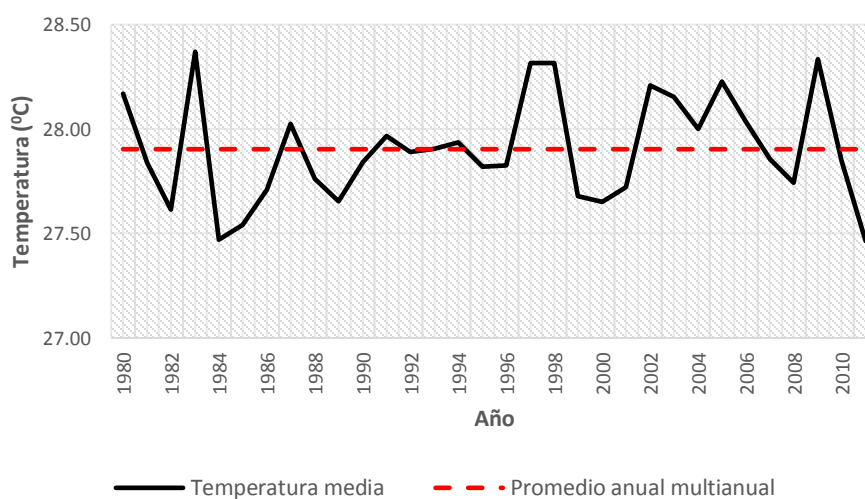
- Fase Niña: El impacto en la variable precipitación en la fase Niña del ENOS es bastante importante y se aprecia en los resultados resumidos en la Figura 2-14, en donde todos los trimestres presentados registran aumentos significativos en comparación con el año neutro, con valores que superan incluso el 100% en gran parte de estos.



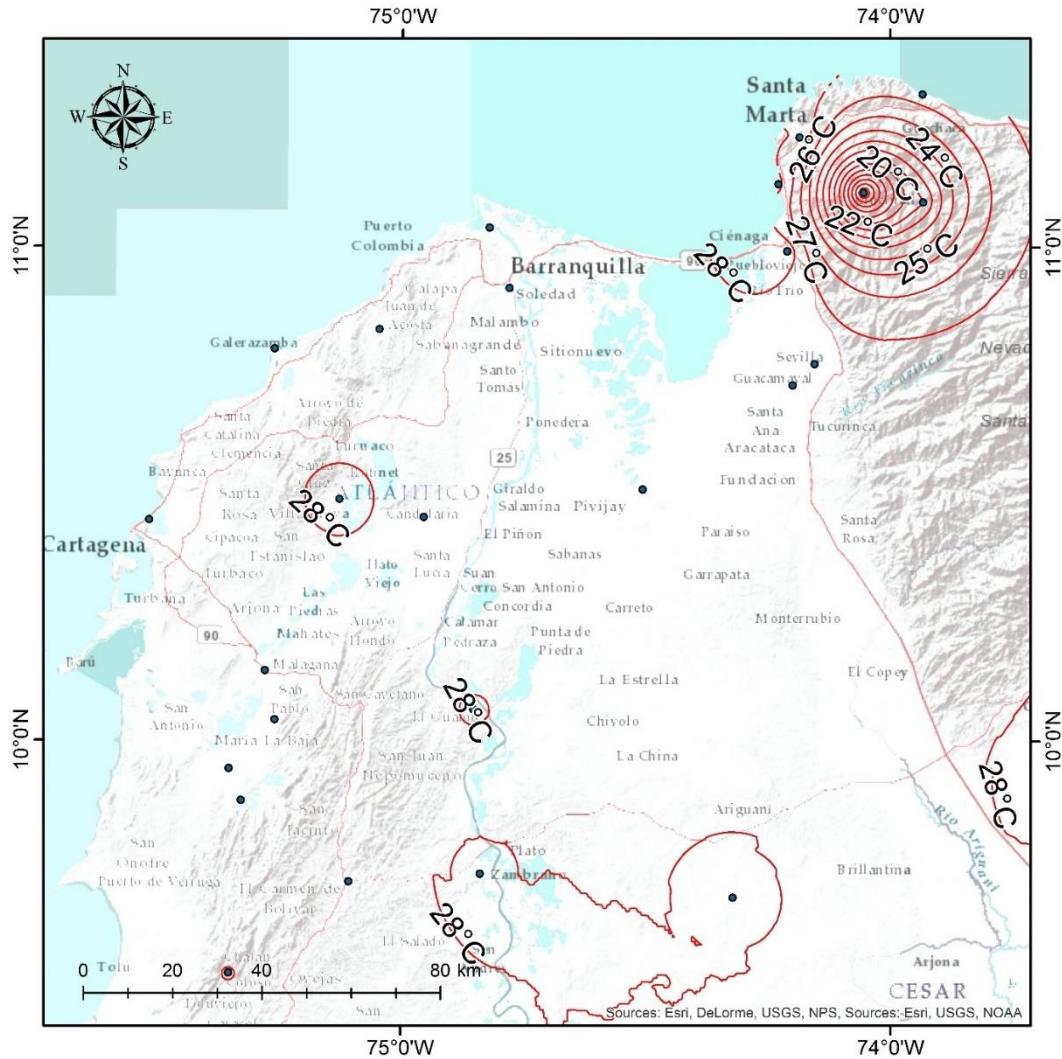
**Figura 2-14:** Precipitación mensual acumulada (trimestral) en la estación Ernesto Cortissoz (2010 – 2011) Vs. anomalía ONI2. (fenómeno La Niña). Fuente: Elaboración propia.

Si bien, la comparación anterior no detalla la magnitud de las anomalías, se logra evidenciar que la zona de estudio tiene un comportamiento hidrológico influenciado por los fenómenos macroclimáticos y que, por tanto, es de esperar que un análisis de intercambios hídricos entre los distintos cuerpos lenticos (ciénagas) y loticos (corrientes hídricas), se realice de forma diferenciada para cada uno de estos escenarios, año normal, año Niño y año Niña. Dichos períodos se especifican en el capítulo correspondiente a los análisis respectivos.

Junto con la precipitación, la temperatura es una de las variables más importantes para describir la climatología. La zona de estudio cuenta con 13 estaciones que reportan esta variable y se caracteriza por registrar mínimos del orden de 24 °C, máximos que pueden superar incluso los 38 °C y valores promedio de 28 °C, aproximadamente. Esto se resume en la Figura 2-15 y Figura 2-16, para el período 1980 – 2011, donde se puede apreciar que la temperatura media anual varía en  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Según el método Caldas para clasificación de clima (U. del Magdalena, 2011), las zonas con elevaciones menores a 1000 msnm y temperaturas mayores o iguales a 24 °C son clasificadas como clima Cálido, como es el caso de la zona de estudio; esto trae consigo que los tipos de cobertura vegetal, entre otros aspectos morfológicos, tengan características especiales, razón por la cual en estos análisis no ha sido incluida estrictamente la Sierra Nevada de Santa Marta, por tener pisos térmicos diferentes.



**Figura 2-15:** Valores de temperatura promedio anual (1980 – 2011). Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2-16:** Temperatura anual multianual en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

## 2.2.2 Dinámica fluvial en la zona de estudio

La geología de la zona de estudio presenta una geoestratigrafía del período cuaternario<sup>7</sup> que inició hace 2 millones de años y se caracteriza por depósitos no consolidados los cuales cubren principalmente el valle y la parte norte de la cuenca del río Magdalena. Estos depósitos son de origen aluvial, lacustre y marino (CORMAGDALENA, 2007). En este sector, la Sierra Nevada por su elevación es un caso geomorfológico especial. La Sierra es el resultado de la tectónica reciente y continua de gran escala, caracterizada por una extensa zona baja y pantanosa que es adyacente a la Sierra y que se extiende hasta el río Magdalena, ya que estas zonas pueden ser el resultado de una tectónica extensional que da origen a bloqueos de aguas controladas por fallamiento normal y no zonas debidas a simples características de llanuras de inundación (Short and Jr, 1986). Este fallamiento crea unas características tipo graben o fosa tectónica, en las cuales el terreno se ha hundido y se forman los pantanos (Short and Jr, 1986). Lo anterior explica el desplazamiento del río Magdalena hasta su posición actual; la Figura 2-17 y Figura 2-16 detallan esta interpretación, en donde resaltan la zona de falla Santa Marta / Bucaramanga, las zonas estructurales altas alrededor de la CGSM y por lo tanto las zonas bajas de ciénagas que demarcan el área de circulación de agua cuando el río Magdalena rompe hacia su valle inundable.

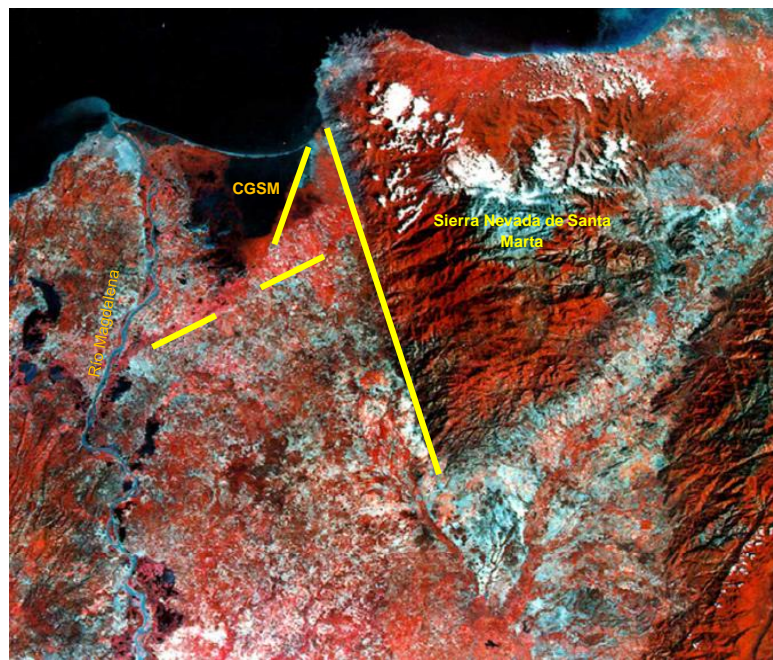
Adicionalmente, la geomorfología entre Calamar y Bocas de Ceniza está caracterizada principalmente por la dinámica fluvial del río Magdalena, dentro de la cual, el proceso fundamental es la sedimentación debido a las bajas pendientes de este, aproximadamente 5 cm/km, que ocasiona la divagación del cauce, la formación de depósitos, barras, etc., y luego meandros. De acuerdo con (CORMAGDALENA, 2007), esta geomorfología se puede considerar la más compleja en la cuenca del río Magdalena, teniendo en cuenta además la presencia del delta del río Magdalena, formado por la entrada del río en el Mar Caribe, los cambios del nivel del mar, las estructuras geológicas y la fuerte acción antrópica ejercida sobre los suelos de la zona. Los ambientes más característicos en la zona resultan

---

<sup>7</sup> Era Cenozoica, Período cuaternario, Época Holoceno/pleistoceno.



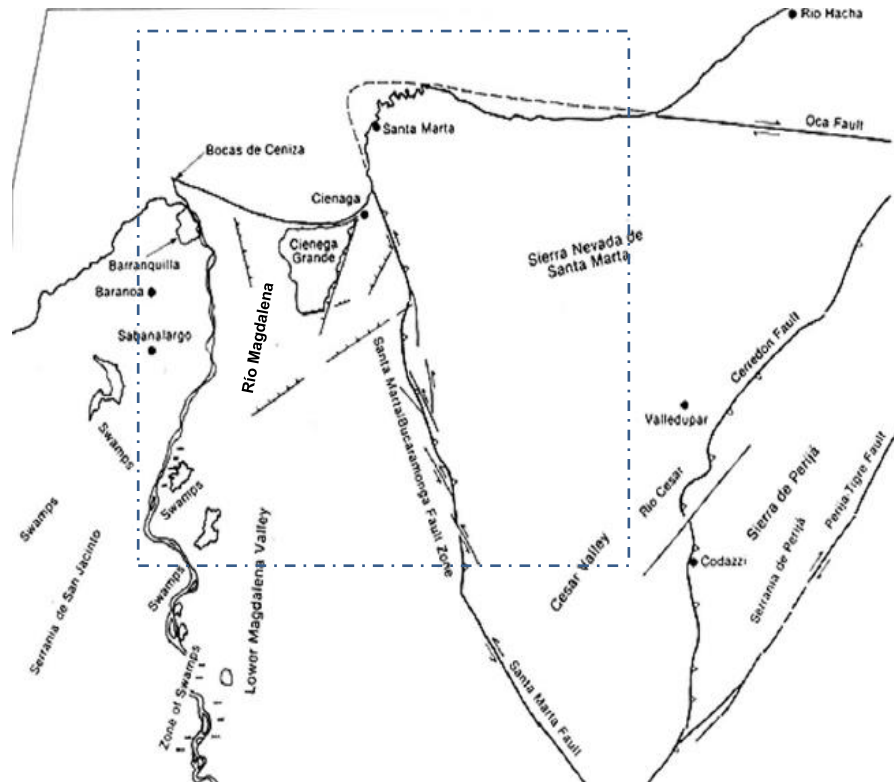
ser fluvial y lacustre, con la presencia de importantes barras, algunas ya estabilizadas que forman islas y diques naturales, que mantienen tramos del río invariables en el tiempo, terrazas intermedias y bajas que originan un valle de inundación pronunciado con importante presencia de cuerpos cenagosos interconectados y meandros abandonados, con evidencias de paleocanales del río Magdalena, principalmente hacia el costado oriental. En esta geomorfología actual, resalta la presencia de importantes ejes viales y diques (intervención antrópica), los cuales, en la mayoría de los casos, alteran y cambian el funcionamiento natural del hidrosistema, limitando la conexión río – ciénagas a pasos controlados, y la extensión de estas últimas.



**Figura 2-17:** Mosaico imágenes Landsat utilizadas en la interpretación geológica.

Fuente: (Short and Jr, 1986)



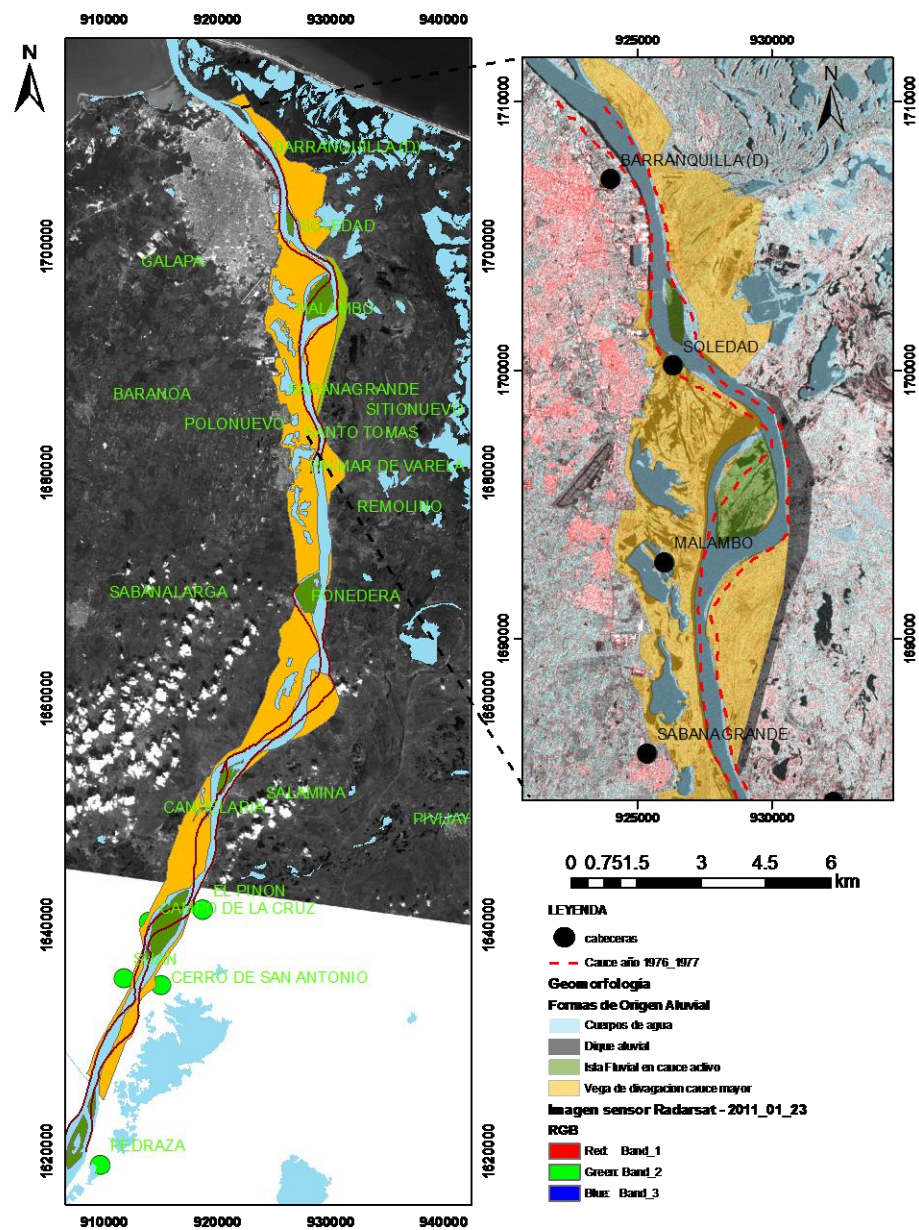


**Figura 2-18:** Interpretación geología estructural a partir de la imagen Landsat de la Figura 2-17, en el recuadro se destaca la zona del presente estudio. Fuente: (Short and Jr, 1986).

De otra parte, a partir de un análisis multitemporal de imágenes satelitales en la zona de estudio, se pudo evidenciar la vega de divagación máxima del río Magdalena, y cómo han variado además los cuerpos cenagosos en el sector, permitiendo establecer el cauce mayor reciente del río Magdalena y así la franja de inundación del sector. Se utilizaron distintos productos satelitales y análogos, imágenes satelitales tipo radar y ópticas, modelos de elevación digital, mapas geológicos, etc. El resultado constituye un producto de esta investigación, el cual se resume en las Figuras 2-17, 2-18, 2-19.

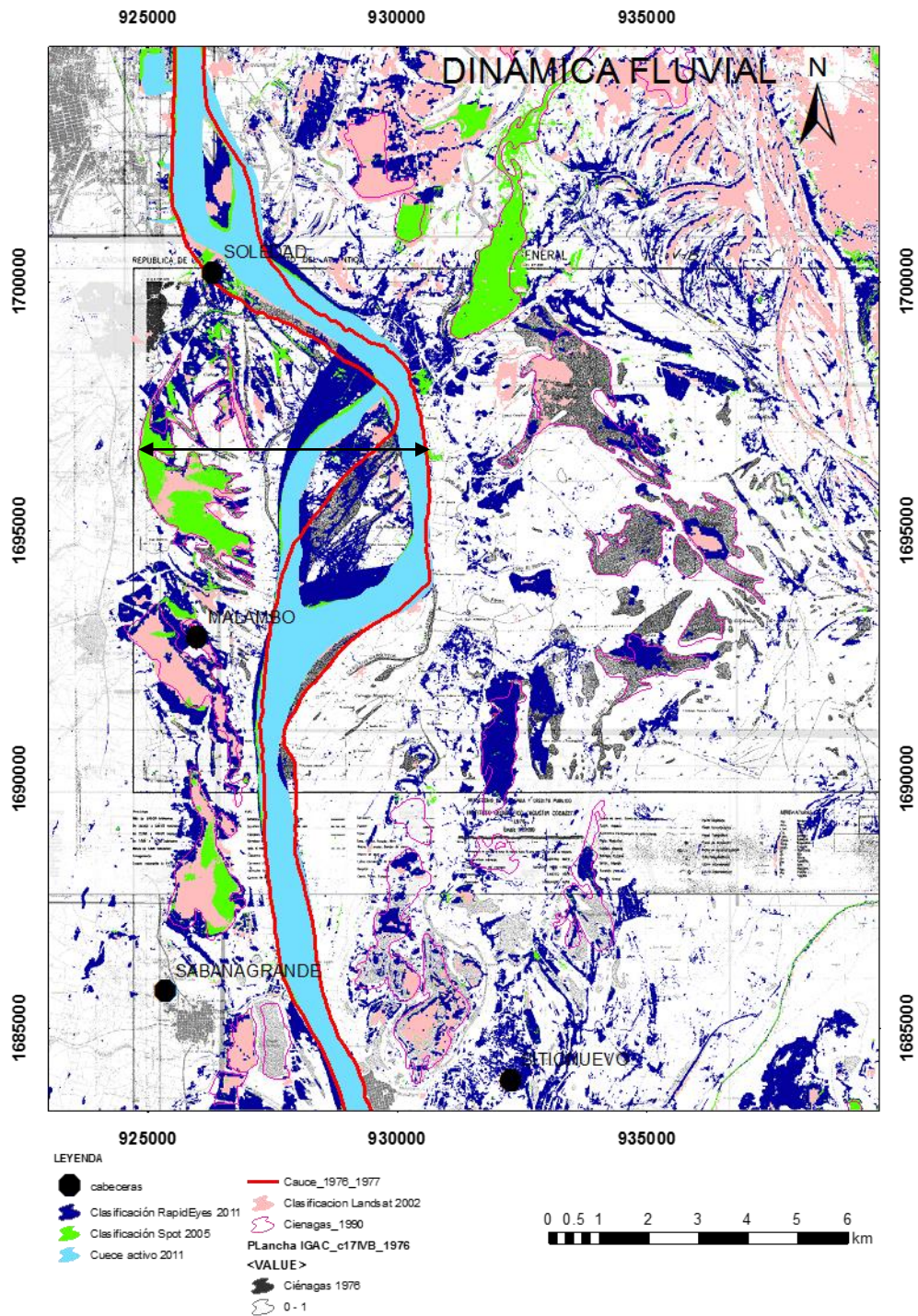
La Figura 2-19 detalla la geomorfología de la zona y se resalta la zona ubicada más al norte, cerca de Barranquilla. En color amarillo está la vega de divagación del río Magdalena y por ende el lecho mayor, área que corresponde a la zona por donde el río ha divagado en su historia geológica y puede transcurrir en cualquier momento (Vargas Cuervo, 2015);

otro elemento morfológico destacable es la isla fluvial (isla Rondón) ubicada en el K20, mientras que, al costado oriental de la misma se encuadra un dique aluvial que controla el Magdalena en el sector. Este dique aluvial se hace evidente al comparar el cauce activo al año 2011 (color azul), con el cauce identificado para el año 1976 (color rojo), este último a partir de la digitalización de la plancha IGAC (C\_171vB). Hacia el costado occidental se encuentran ciénagas conectadas al río Magdalena y entre sí, estas constituyen el complejo cenagoso del Departamento del Atlántico; en la figura están las ciénagas Sabanagrande y Malambo, más al norte. En la Figura 2-20 se presenta la franja de divagación del río Magdalena a través de un análisis multitemporal de imágenes de distintos sensores remotos, la cual está sobre las planchas IGAC de 1976. Se aprecia para los años 1976, 1990, 2002, 2005 y 2011, los cauces activos del río Magdalena junto a los espejos de agua en las ciénagas. Es notable la dinámica del río Magdalena en la zona, donde los espejos de agua en las ciénagas también han variado; además, se identifica un paleocauce del río Magdalena más al oriente del cauce activo al año 2011, esta geoforma representa un antiguo cauce del río Magdalena (Vargas Cuervo, 2015), con lo cual queda claro que toda esa zona perteneció al río Magdalena. Otra zona del río se muestra en la Figura 2-21, esta corresponde al (K50), entre los municipios de Ponedera (Atlántico) y Remolino (Magdalena). Nótese la dinámica de las orillas en este sector al comparar la cartografía análoga del IGAC, con fecha de 1956, con imágenes satelitales del sensor Landsat TM, más recientes, años 1998 y 2002. Finalmente, como resultado de estos análisis se obtiene el cauce histórico de río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza a partir de un criterio geomorfológico, el cual corresponde a la vega del río Magdalena.

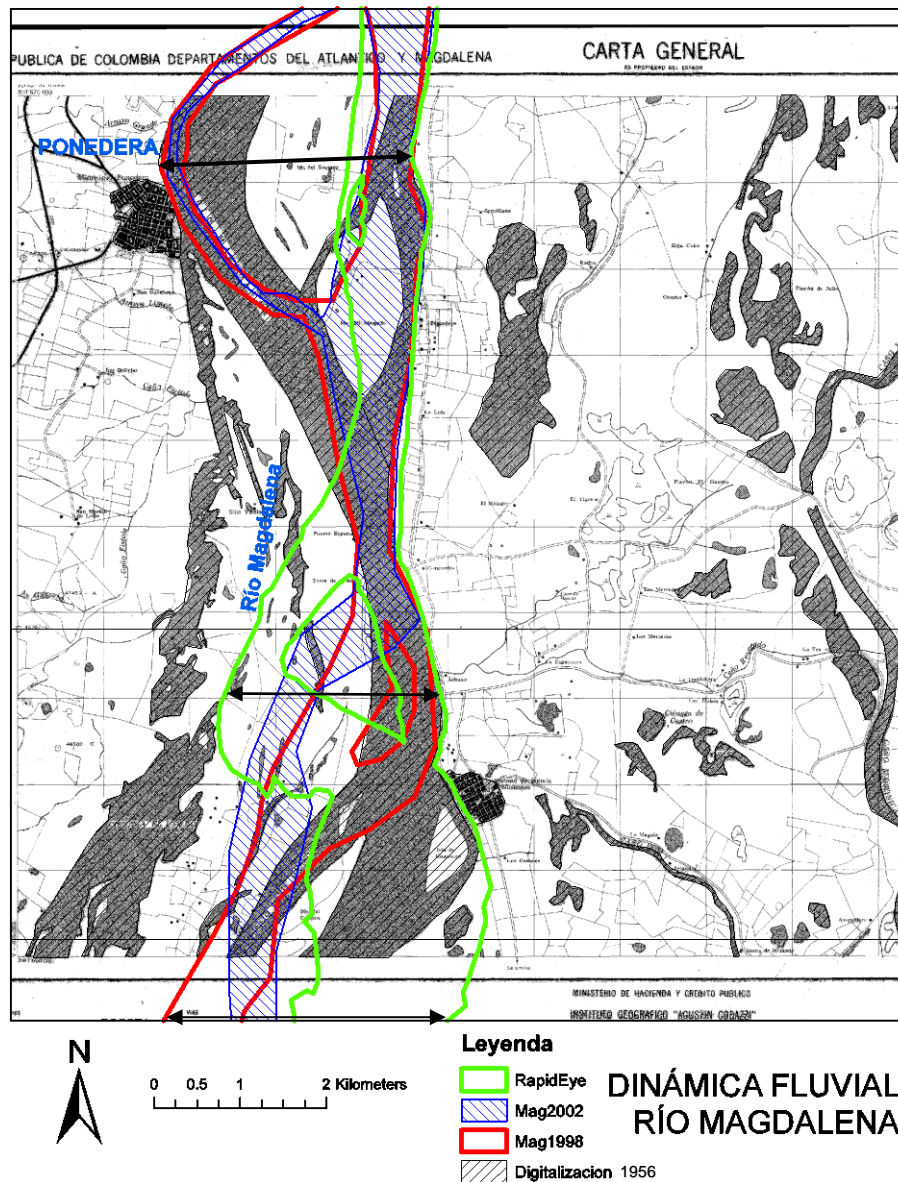


**Figura 2-19:** Geomorfología fluvial en la zona de estudio entre Calamar - Bocas de Ceniza.  
Fuente: Elaboración propia.





**Figura 2-20:** Dinámica fluvial río Magdalena entre Calamar – Bocas de Ceniza. Municipios de Sabanagrande y Soledad. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2-21:** Dinámica fluvial río Magdalena entre Calamar – Bocas de Ceniza. Municipio de Ponedera. Fuente: Elaboración propia.

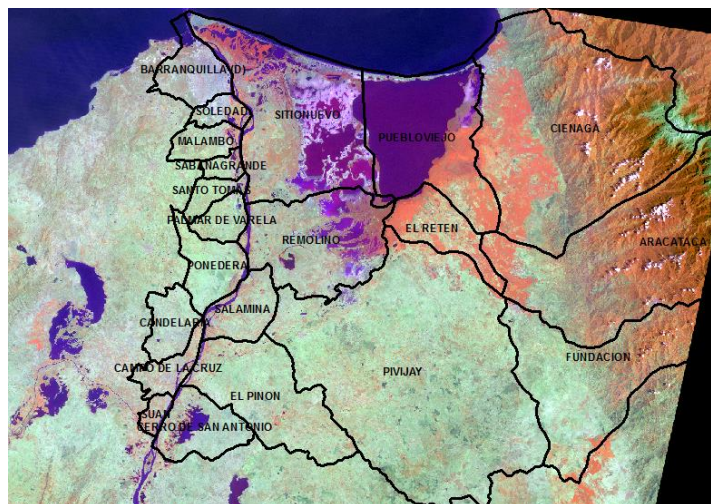
## 2.3 Comentarios finales del Capítulo 2

En el área particular de estudio se destaca la presencia del mayor centro urbano de la región Caribe: Barranquilla. Dada su condición de puerto fluvial y marítimo esta ciudad, que actualmente cuenta con una población de 1.386.865 habitantes, según el DANE, 2005, concentra cerca del 51% de la población del Departamento del Atlántico, de ahí su importancia en la región. También en el costado occidental se encuentran las poblaciones de Soledad, Malambo, Sabanagrande, Santo Tomás, Palmar de Varela, Ponedera, Candelaria, Campo de la Cruz, y Suan, con interacción directa con el río Magdalena; estos municipios tienen un componente social importante asociado con todo el hidrosistema de la zona, del cual muchas familias derivan su sustento directo o indirecto, mediante actividades de acuicultura, pastoreo, agricultura, etc. (U. del Magdalena, 2011). También los servicios públicos de acueducto y alcantarillado, se relacionan de forma directa con el hidrosistema; las captaciones de agua para suministro de acueductos se realizan principalmente desde el río Magdalena y continuamente se ven afectadas por la dinámica de éste, ya que en muchos casos los sistemas de bombeo flotantes quedan en seco, por la sedimentación y posterior cambio de posición del río; mientras que, para el caso de los sistemas de alcantarillado sólo sirven a la población asentada en los cascos urbanos y con coberturas cercanas al 60%; los sistemas de tratamiento existentes, en la mayoría de los casos funcionan deficientemente (U. del Magdalena, 2011), lo que trae consigo una afectación a la calidad de agua en los sitios en donde se realicen estos vertimientos, principalmente ciénagas.

El costado oriental de la zona de estudio, en el Departamento del Magdalena, tiene características climáticas muy similares a las presentadas en el costado occidental. En este costado se encuentran los centros poblados de Sitionuevo, Remolino, Salamina, El Piñón y Cerro San Antonio, conectados directamente con el río Magdalena; sin embargo, como fue discutido en los apartados anteriores, esta es una extensa zona de descanso del río Magdalena, razón por la cual poblaciones como Pivijay, El Retén, Pueblonuevo, Ciénaga, Fundación y Aracataca, también se relacionan con todo el hidrosistema entre el



río Magdalena y la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), ver Figura 2-22. Todos estos aspectos, zona de regulación de caudales, interacción río – Ciénagas, etc., dan cuenta de la importancia en la zona del sistema río Magdalena – ciénagas.



**Figura 2-22:** Municipios con intervenciones directas o relacionadas con el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Hacia finales de 2010 con la denominada ola invernal que afectó todo el país y esta zona en particular, quedó en evidencia la limitada planeación sobre el hidrosistema y la vulnerabilidad de este ante escenarios extremos, con las inundaciones más críticas de la historia reciente en esta zona del país, que ocasionaron incalculables pérdidas económicas y efectos sociales. Ver Figura 2-23.



Suan (26/01/2011)



Campo la Cruz (16/12/2010)

**Figura 2-23:** Registro fotográfico de algunas zonas afectadas durante la ocurrencia de la Fase Niña del ENOS entre 2010 y 2011. A la izquierda el municipio de Suan y a la derecha el municipio de Campo de la Cruz, ambos, en la parte baja de la zona de estudio. Fuente: IDEHA - Gobernación del Atlántico, 2011.

Distintos investigadores (Poveda, 2004b; Poveda, Gil, et al., 1998; Múnera, Vélez, et al., 2003a), han demostrado que la hidroclimatología del país se ve afectada, entre otros, por la presencia de fenómenos macroclimáticos como el ENOS en sus fases El Niño y La Niña, lo cual, ha quedado en evidencia para la zona de estudio, a través de los análisis detallados en este capítulo y basados en los datos de precipitación recibidos. Se concluye por tanto que cualquier estudio de intercambio hídrico río Magdalena – ciénagas y viceversa, debe contemplar por lo menos estos tres escenarios de funcionamiento del hidrosistema (seco, húmedo, normal), como fue comentado anteriormente, en aras de poder disminuir la vulnerabilidad de las comunidades asentadas en la zona, ya que la carencia de conocimiento en cuanto a volúmenes de intercambio hídrico interanual e intranual y sus efectos, limita la adecuada planeación de los entes territoriales y autoridades regionales encargadas de la gestión del recurso hídrico en la zona. Teniendo en cuenta lo anterior, la multiplicidad de soluciones individuales ante problemáticas como inundaciones (jarillones, compuertas, diques, etc.) y la carencia de herramientas adecuadas que permitan una mejor gestión y planeación de acciones sobre el hidrosistema regional del Bajo Magdalena, esta investigación pretende contribuir al entendimiento hídrico de la macroregión, a través del conocimiento de los intercambios hídricos río Magdalena – Ciénagas, y viceversa, aplicando modelación matemática y otras herramientas.

Con respecto a las inundaciones, también se aborda en la investigación esta problemática, mediante la implementación en la zona de estudio de una metodología que contempla la inclusión de aspectos geomorfológicos e hidráulicos en la delimitación de la zona de inundación del río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza (Barranquilla). Sin duda existe un enorme reto en la rigurosa implementación y calibración del modelo hidráulico, la cual se ha apoyado en productos de sensores remotos, dada la limitante en la información disponible.



### 3. Estado del arte y propuesta metodológica

Una vez descritas las particularidades físicas de la zona de estudio y la problemática que esta enfrenta, en cuanto al desconocimiento general del hidrosistema, además del riesgo por inundación sobre poblaciones ribereñas, lo cual la hace notablemente vulnerable a la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos como el ENOS (El Niño o La Niña), evidente entre los años 2010 – 2011, en este Capítulo se propone la metodología para investigar intercambios hídricos e inundabilidad a nivel regional en zonas amplias con información limitada o escasa.

Distintos estudios han sido realizados de forma aislada en la zona de estudio, lo que no ha permitido una adecuada articulación de toda la información topográfica, y de funcionamiento de todo el macro sistema. Haciendo un recorrido iniciando en el costado occidental de la zona de estudio, en la jurisdicción de la CRA, allí se destacan los estudios realizados en los POMCAS (Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas) del año 2007 y 2011 (U. del Magdalena, 2011; CRA, 2007). En estos documentos se detallan importantes aspectos hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos desde la ciénaga Sabanagrande al norte, hasta el complejo cenagoso del Uvero, más al sur del departamento del Atlántico y se incluyen además descripciones sociales y las interacciones de la comunidad con los recursos hídricos de la zona. También en el departamento del Atlántico, (Amador, 2013) analiza, a partir de la modelación matemática en hidráulica, la generación de mapas probabilísticos de inundación en el sector comprendido entre las ciénagas El Convento y Paraíso, entre los municipios de Ponedera y Palmar de Varela, utilizando el modelo hidrodinámico SOBEK (*1D-2D*), el cual resuelve la hidrodinámica del cauce principal en *1D* y de la zona de inundación en *2D*. La evaluación de la modelación efectuada se realizó a partir de la comparación de la mancha de inundación simulada, con el resultado de la mancha de inundación extraída de la imagen de sensor remoto Landsat para el año 2007, mostrando en sus resultados el comportamiento hidráulico del sector

analizado y las manchas máximas de inundación esperadas para distintos escenarios. Esta aproximación a la calibración del parámetro “ $n$ ” de Manning del modelo hidráulico de la zona, presenta resultados que obviamente dependen de las condiciones de frontera establecidas en la modelación, mostrando la importancia de obtener mayor información de campo, según el autor.

Hacia el costado oriental, departamento del Magdalena, distintas entidades e instituciones han abordado con variados fines y enfoques el estudio de la zona. (Díaz-Granados, Camacho, et al., 1996), presentan una metodología para la modelación de ciénagas a partir de los balances hídricos elaborados con agregación temporal de 10 días, entre (1967 y 1984), simulando la conexión del río Magdalena al occidente de la CGSM, la interconexión entre ciénagas, el aporte de los ríos provenientes de la margen occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta y los controles impuestos por el Mar Caribe al norte de la CGSM. Los resultados de las modelaciones realizadas para época húmeda y época seca, muestran que ante la disminución de aportes de agua dulce en las ciénagas se generan aumentos en la salinidad de las mismas, estimándose hasta 5 veces más en la ciénaga La Ahuyama. Además, en el escenario de tiempo húmedo modelado se reporta un volumen de 5999 Mm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos) hacia la CGSM, con lo cual se disminuyen los niveles de salinidad por el importante ingreso de agua dulce al cuerpo de agua.

Una descripción detallada de la historia de los caños de conexión entre el río Magdalena y la CGSM es presentada por (Múnera, Vélez, et al., 2003b), quienes describen el análisis de la CGSM utilizando datos de sensores remotos, incluyendo los datos del sensor TOPEX-POSEIDON, para calibración del modelo implementado aplicando un balance hídrico de largo plazo para la estimación de los intercambios hídricos. También (Munera, Vélez, et al., 2003a), detallan en este estudio la aplicación del balance hídrico en la zona en la cual se considera cada ciénaga como un tanque donde se cumple el principio de conservación de masa, siendo las variables precipitación y evapotranspiración consideradas como principales, mientras que la infiltración, en suelos arcillosos que forman diques y basines, como una variable secundaria con magnitudes dos a tres veces menores que las de las variables principales. De esta manera los intercambios con el subsuelo

(aguas subterráneas) no son incluidos en el análisis. La limitante en la información disponible se deja entrever en este último documento dónde ha sido difícil la implementación exhaustiva de los procesos de calibración y validación y por lo tanto, los resultados arrojados por los modelos reflejan son ordenes de magnitud, según los autores.

De otra parte, el análisis de la hidrodinámica es muy importante también en la evaluación de la calidad de agua del complejo lagunar CGSM. A este respecto por ejemplo, (Betancourt and Ramírez-Triana, 2005) realizan un análisis de la persistencia de plaguicidas organoclorados (agentes contaminantes) que también pueden provenir del río Magdalena. El análisis de los intercambios hídricos río-ciénagas resulta crucial en este tipo de estudios.

Una mención especial sobre estudios realizados al complejo lagunar CGSM, merece el proyecto Colombo – Alemán pro-ciénaga 1993, el cual tuvo como objetivo la recuperación ambiental de la ecorregión CGSM, la calidad de las aguas, la reforestación del mangle y la reactivación de los flujos de agua entre el río Magdalena y la CGSM; a este respecto se destacan las dimensiones de las estructuras proyectadas, la sección transversal y la pendiente de los canales de conexión entre el río Magdalena y el complejo lagunas Pajalar y la CGSM (CORPAMAG-DNP-PROCIÉNAGA, 1993).

Sobre el río Magdalena se ha consultado principalmente los estudios elaborados por CORMADALENA, el LEH<sup>8</sup> de Las Flores y UNINORTE; (CORMAGDALENA-UNINORTE, 2007) realizó una actualización de la caracterización hidráulica y sedimentológica del río Magdalena entre el Puente Pumarejo (K22) y la desembocadura en el Mar Caribe (K0). Este estudio presenta una comparación entre mediciones de niveles realizadas sobre el río Magdalena en diferentes épocas y los niveles de predicción del Mar Caribe en la estación IDEAM Puerto Colombia, encontrando una gran similitud entre los datos medidos y los pronosticados por el IDEAM para el Mar Caribe. Lo anterior se considera de gran importancia teniendo en cuenta que existe una gran limitación de información en el área de estudio y en este caso las predicciones del IDEAM podrían ser de gran ayuda.

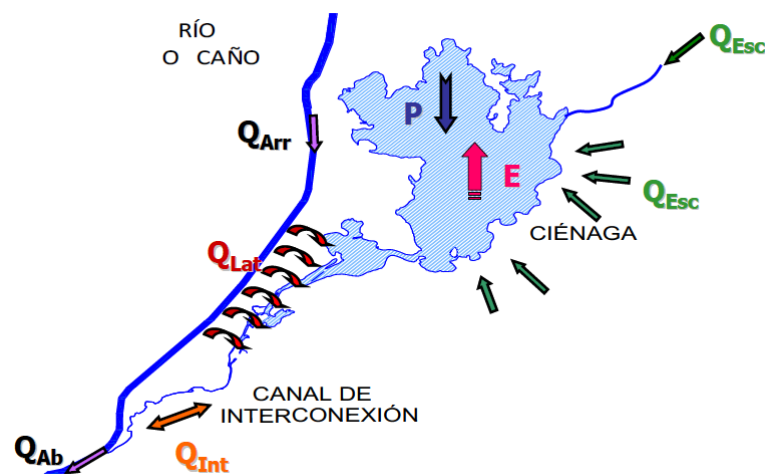
---

<sup>8</sup> Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores (Barranquilla).

Los estudios referenciados anteriormente tienen en común la sectorización del área de análisis según el objetivo de cada estudio y el alcance de la entidad que los realiza. Sin embargo, y quizás por el gran reto, dentro de la información consultada, no se encuentra un análisis a escala regional del hidrosistema entre Calamar y Bocas de Ceniza, incluyendo el río Magdalena, los sistemas cenagosos del costado occidental, principales caños y ciénagas del costado oriental y los aportes hídricos de escorrentía superficial provenientes de las microcuencas aportantes a los cuerpos hídricos de esta región, como un todo. No obstante, los estudios arriba citados son referencia especial para el conocimiento del hidrosistema e insumo básico para poder abordar en esta investigación su análisis hidrológico e hidráulico, integrando la totalidad de la limitada información reportada para la zona.

Estudios de hidrosistemas complejos realizados en otras zonas del Magdalena también fueron consultados y entre estos se destacan el estudio de la ecorregión del Canal del Dique y el de la Mojana. En el estudio del Canal del Dique, (CORMAGDALENA-UNAL, 2007), se analizó el hidrosistema compuesto por el canal principal y las ciénagas circundantes y a través de modelación matemática en hidrología e hidráulica fue posible establecer los intercambios hídricos canal – ciénagas y mejorar el entendimiento del hidrosistema. Para la modelación hidrológica de las cuencas aferentes a los ocho principales cuerpos cenagosos se utilizó la herramienta computacional HEC-HMS del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos en modelación extendida o modelación tipo continuo con resolución temporal diaria; los caudales así generados fueron integrados posteriormente a la modelación hidráulica implementada a través del modelo matemático integrado hidráulico, de calidad del agua y ecológico MDLC-QUASAR extendido desarrollado por la Universidad Nacional para el Canal del Dique y su Sistema Lagunar, e implementado en el proyecto CORMAGDALENA-UNAL (2007a, 2007b; Camacho et al., 2008). La conceptualización de la modelación efectuada se resume en la Figura 3-1.

En la región de la Mojana, (DNP-UNAL, 2012), realizaron e implementaron un modelo integrado, hidrológico, hidráulico y de calidad del agua, representando los cuerpos de agua principales, como son los ríos Cauca, San Jorge y el Brazo de Loba del río Magdalena, ciénagas y caños principales tales como los caños Barro-Pescado, Muñoz, San Matías, Rabón, Largo-Gramalote-Ventanillas, Mojana, y Panceguita y sus interacciones. La hidrología del modelo fue realizada a partir de la implementación de balances hídricos, mientras que para la modelación hidráulica se utilizó el mismo modelo MDLC-QUASAR extendido, referenciado anteriormente.



**Figura 3-1:** Esquema de flujos de entrada y salida de una ciénaga. Fuente: Adaptado de (CORMAGDALENA-UNAL, 2007).

El entendimiento de zonas planas con intercambios hídricos es una inquietud marcada no solo desde la perspectiva misma de los volúmenes, sino también de los caudales pico, ya que estas zonas naturales se constituyen en zonas de amortiguamiento natural de crecientes y en mitigadoras de inundaciones. La modelación matemática en zonas con características parecidas a las de estudio ha sido reportada por distintos investigadores mostrando la aplicación de distintas herramientas computacionales ( $1D$ ), ( $2D$ ) y/o ( $1D/2D$ ), principalmente, teniendo en cuenta que la extensión de las áreas de análisis limita la eficiencia de computación y por lo tanto una modelación ( $3D$ ) se vuelve irrealizable al ser demasiado compleja. La filosofía y características de estos modelos se explican más adelante en este documento.

Como referencia internacional (Javaheri and Babbar-Sebens, 2014), en (*Eagle Creek Watershed*) con área de 472 km<sup>2</sup> en Indiana, USA, analizan el efecto sobre la mitigación de inundaciones que tienen las ciénagas, estudiando la reducción de caudales y los mapas de velocidades de flujo en el canal principal y las zonas de ciénagas o desborde, lo anterior se realizó acoplando los resultados de la modelación hidrológica realizada con la herramienta SWAT (Neitsch, Arnold, et al., 2011) y la modelación hidráulica implementando el modelo HEC-RAS (Brunner, 2016). Se reportan reducciones entre 20-41% en los picos de caudales dependiendo de la magnitud de inundación.

En la revisión bibliográfica efectuada se destaca que la aplicación más comúnmente encontrada es la modelación hidráulica a partir de modelos (1D) y principalmente del modelo HEC-RAS (Brunner, 2016). Para el caso de ciénagas el modelo (1D) requiere la implementación de estructuras de control como vertederos mientras que las ciénagas son representadas como embalses o zonas de almacenamiento; además, es necesario un conocimiento de la dirección preferente de flujo. (Tamiru Haile, 2005), realiza este mismo tratamiento cuando es analizada la inundación en zonas planas, donde la representación de la población es elaborada también a través de zonas de almacenamiento. Por otra parte, los modelos (2D) permiten representar el flujo en la llanura de inundación y solo requieren de un MDT adecuado; sin embargo, se debe ponderar el tamaño del área de estudio para no generar traumatismos en los tiempos y demandas computacionales de estos modelos que resultan ser la mayoría de las veces más exigentes. Sobre este particular cabe recordar que el tamaño del área de estudio en el presente análisis es de aproximadamente 8,000 km<sup>2</sup>, y la longitud de caños y río Magdalena es cercana a los 170 km.

### 3.1 Modelación matemática en hidrología

El concepto de modelación matemática de un sistema hidrológico puede entenderse, en un sentido amplio, como la descripción matemática de ciertos aspectos de los sistemas hidrológicos. La historia de la modelación de los sistemas hidrológicos está estrechamente vinculada a la aparición y evolución de los computadores (OMM, 2011), y hoy en día ésta se ha convertido en una herramienta muy importante para apoyar la gestión integral de los recursos hídricos.

Los modelos hidrológicos, en una primera clasificación, se pueden considerar como determinísticos o estocásticos. Los modelos determinísticos permiten una sola respuesta para una simulación con un conjunto de parámetros seleccionados. Los modelos estocásticos por su parte, permiten cierta aleatoriedad o incertidumbre en las posibles respuestas debido a la incertidumbre en variables de entrada, condiciones de frontera o parámetros de los modelos (Beven, 2011). La gran mayoría de modelos usados en la modelación lluvia – escorrentía son de tipo determinístico. Sin embargo, muchas veces la distinción entre ambos tipos de modelos no es clara, ejemplo es la existencia de modelos que agregan un modelo de error estocástico para predicción determinística en un modelo hidrológico estocástico y hay modelos que usan una función de distribución de probabilidad en la variable de estado para hacer predicciones de manera determinística (Beven, 2011). Entre los modelos determinísticos se encuentran los modelos de caja negra, redes neuronales, modelos conceptuales, modelos distribuidos, etc.

Los modelos de caja negra hacen referencia a aquellos modelos en los que no se busca detallar el comportamiento del fenómeno sino reproducir los valores de entrada y salida del sistema: las redes neuronales son una representación de este tipo de modelos. Estos modelos no son aplicables en aquellos casos en los que es necesario el estudio de la variabilidad de clima, dado que se requiere información estructurada de los procesos. En cambio, se requerirán en estos casos los modelos conceptuales que aplican conceptos simplificados de los procesos físicos de generación de escorrentía (OMM, 2011)

Otra subclasificación de los modelos hidrológicos se establece entre modelos agregados o distribuidos. Modelos agregados tratan la cuenca como una unidad simple, con variables de estado que representan promedios sobre el área de la cuenca, tal como el promedio del almacenamiento en la zona saturada (Beven, 2011). Originalmente para la modelación hidrológica se acostumbra el uso de modelos que agregan las características de la cuenca, principalmente debido al requerimiento de información. Un ejemplo es la herramienta computacional HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Lo opuesto a los modelos agregados son los modelos distribuidos, estos requieren información más detallada de la cuenca y por tanto son más difíciles de implementar. Los modelos distribuidos suponen que son distribuidos en espacio, con variables de estado que representan promedios locales de almacenamiento, profundidad de flujo o potencial hidráulico, por discretización de la cuenca ingresando un gran número de elementos o celdas cuadradas y resolviendo las ecuaciones para las variables de estado asociadas a cada celda (*pixel*) (Beven, 2011).

Existen muchas herramientas computacionales que pueden ser utilizadas para realizar modelación matemática en hidrología. (Beven, 2011), propone la siguiente metodología para la selección del modelo, basada esencialmente en consideraciones de la posible estructura del mismo:

1. Realizar una lista de los modelos en consideración. Esta lista puede incluir dos partes: aquellos modelos que son fácilmente aplicables y aquellos que, aunque complejos, deben considerarse en un proyecto si la inversión en tiempo y dinero no son una restricción.
2. Preparar una lista de las variables previstas y requeridas por cada modelo. Decidir si el modelo bajo consideración producirá las salidas requeridas para satisfacer el objetivo particular de un proyecto.
3. Preparar una lista con las suposiciones hechas por el modelo. ¿Son las suposiciones probablemente limitantes en términos del conocimiento que se tiene acerca de la respuesta de la cuenca?



4. Hacer una lista de las entradas requeridas por el modelo para especificar el flujo dominante, las fronteras y condiciones iniciales, y para la especificar los valores de los parámetros. Decidir si toda la información requerida puede ser provista dentro de las limitaciones de tiempo y costo del proyecto.
5. Determinar si se tiene el posible modelo en la lista. Si no, revisar los tres pasos anteriores, relacionados con los criterios usados.

Basado en las recomendaciones anteriores, a continuación, se presenta una perspectiva de algunos de los modelos hidrológicos existentes, los cuales fueron analizados como potencialmente aplicables en el desarrollo de la presente investigación. Es de anotar que, sin lugar a dudas, la implementación de un modelo depende del tipo de información disponible para tal fin, de lo contrario, otra posibilidad para abordar el componente hidrológico en zonas con información limitada, resulta ser la utilización de ecuaciones de regionalización, la aplicación del balance hídrico (BH) y balance hídrico de largo plazo (BHLP), con las cuales se pretende tener en forma resumida herramientas para el análisis aproximado del componente hidrológico de los sistemas hídricos.

En la Tabla 3-1 se presenta, a manera de resumen, una breve descripción de los modelos hidrológicos considerados aplicables en el presente estudio, destacando principalmente los modelos de uso libre. En la Tabla 3-2 se presentan las características principales de los modelos listados en la Tabla 3-1. Entre las características evaluadas se encuentran, por ejemplo, el tipo de modelo hidrológico (determinístico o estocástico) y si tienen alguna herramienta para la calibración de los parámetros del modelo, entre otros factores.

**Tabla 3-1:** Perspectivas de modelos hidrológicos considerados potencialmente aplicables en esta investigación.

Modelo	Descripción	Referencias
<b>HEC HMS</b>	El Sistema de Modelación Hidrológica (HEC-HMS) está diseñado para simular el proceso <i>lluvia - escorrentía</i> . Sus características le permiten ser aplicable en una amplia gama de áreas geográficas para la solución de problemas como: análisis de la cuenca hidrográfica, inundaciones y escorrentías en cuenca urbana o natural. Los hidrogramas generados por el programa se utilizan directamente, o en conjunto con otros programas, para los estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, la previsión de flujo, el impacto de la futura urbanización, la reducción de daños por inundaciones, regulación de llanura de inundación y la operación de sistemas. Su aplicación principal es a nivel de evento aunque también puede realizar modelación extendida en el tiempo.	(U.S. Army Corps of Engineers, 2000; P., Huber W., 2008)
<b>SWAT</b>	SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo de cuenca fluvial desarrollado para cuantificar el impacto de las prácticas de manejo del suelo en cuencas grandes y complejas. SWAT es un modelo de dominio público apoyado activamente por el Servicio de Investigación Agrícola, USDA en el Laboratorio de Investigación de Pastos, Suelo y Agua en Temple, Texas, EE.UU. Puede ser utilizado a escala regional en estudios de predicción de crecidas e inundaciones, estudios sobre impacto del cambio climático, estudios de impacto ambiental, modelado continuo, tiene la capacidad de modelar cuencas grandes y pequeñas.	(Neitsch, Arnold, et al., 2011)
<b>WATFLOOD</b>	IHA-CRES es una metodología de modelación cuyo propósito es caracterizar la dinámica relación entre las precipitaciones y caudales, con datos de lluvia y la temperatura (o evaporación potencial) permite predecir el caudal. El modelo puede ser aplicado en un rango amplio de escalas espaciales y temporales - desde pequeñas cuencas experimentales, utilizando como pasos de tiempo minutos, días o meses. Puede ser utilizado para llenar los vacíos en los datos, ampliar los registros de caudales, así como para explorar el impacto del cambio climático e identificar los efectos de los cambios de uso del suelo.	(Kouwen et al., 1993)
<b>IHA-CRES</b>	IHA-CRES significa identificación de unidad Hidrográfica y componentes de flujo a partir de lluvias, Evaporación y datos de corrientes.	(Croke, Andrews, et al., 2005)
<b>TOPMODEL</b>	TOPMODEL es un modelo lluvia - escorrentía que basa sus predicciones distribuidas en un análisis de la topografía de la cuenca. El modelo predice el exceso de saturación y el exceso de infiltración de la escorrentía superficial y subsuperficial. Desde el primer artículo que se publicó sobre el modelo en 1979 ha habido muchas versiones diferentes. La idea siempre ha sido que el modelo debe ser lo suficientemente simple para ser modificado por el usuario, de manera que las predicciones se ajusten, en la medida de lo posible a las percepciones de los usuarios de cómo funciona una cuenca.	(K. Beven <i>et al.</i> , 1995; (K. Beven, 2011)
<b>RORB</b>	Es un modelo Australiano, el cual brinda la posibilidad de modelar escorrentía, tránsito de crecientes y calcular pérdidas en cuencas tanto urbanas como rurales a partir de eventos de tormenta. Este modelo es empleado comúnmente en gestión de inundaciones y diseño de vertederos.	(Laurenson, E. M., and Mein, 1995)

**Tabla 3-2:** Características de los modelos hidrológicos considerados potencialmente aplicables en esta investigación.

MODELO	TIPO DE MODELO			HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN		HERRAMIENTA SIG	USO LIBRE
	AGREGADO	DISTRIBUIDO	SEMIDISTRIBUIDO	BÚSQUEDA LOCAL	BUSQUEDA GLOBAL		
HEC HMS **	SI	SI	NO	SI	SI *	SI	SI
SWAT	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI
WATFLOOD	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI
IHACRES	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI
TOP MODEL	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI
RORB	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI

\*ADAPTABLE

TODOS LOS MODELOS SON DETERMINISTICOS

Descritos los modelos hidrológicos considerados con mayor potencial de aplicación en esta investigación, queda claro que la selección final del tipo de modelo aplicable en la zona, dependerá en gran medida de la cantidad y calidad de información disponible, pensando en la implementación rigurosa de un protocolo de modelación que incluya las fases de calibración y validación. Es la carencia de datos una importante limitante para la aplicación efectiva de los modelos *lluvia – escorrentía* y el uso adecuado de los resultados del mismo, dado que se requiere de información coincidente de precipitación dentro de la cuenca y de caudales en la salida de la misma, para la correcta implementación del protocolo de modelación. Es precisamente la carencia de esta información la que obliga a adoptar metodologías alternativas que permitan evaluar el componente hidrológico en zonas con información limitada, siendo las ecuaciones regionalizadas una alternativa viable de aplicación, teniendo en cuenta el uso directo en función de parámetros morfométricos como el área o la pendiente, para describir el potencial de generación de escorrentía en las cuencas aledañas a cuerpo hídricos.

A este respecto, en el año 1995, el antiguo HIMAT hoy en día Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), elaboró para todo el país un ejercicio de regionalización con el cual se buscaba obtener una herramienta adecuada para la estimación de caudales extremos en cauces no principales, a partir de algunas características morfométricas, específicamente el área.

La metodología consistió básicamente en la clasificación del país en 21 zonas hidrológicas homogéneas y posteriormente en un análisis de frecuencia regional de caudales extremos

ajustados a la distribución Gumbel tipo I, que permitió obtener las ecuaciones de regionalización en cada una de las zonas.

Las curvas de frecuencia obtenidas para cada región tienen la forma presentada en la Ecuación 1:

$$A_t = \frac{Q_t}{Q_{2.33}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $A_t$  es el valor establecido para cada región en función del período de retorno,  $Q_{2.33}$  es el caudal promedio de los caudales máximos en  $m^3/s$  y  $Q_t$  el caudal máximo anual con períodos de retorno de  $T$  años.

Adicionalmente, el HIMAT obtuvo para cada región expresiones que ligan el  $Q_{2.33}$  ( $m^3/s$ ) con el área de drenaje de cuencas dentro del rango en el cual fueron deducidas estas ecuaciones ( $km^2$ ), como se presenta en la Ecuación 2.

$$Q_{2.33} = C_4 A^{C_1} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $A$  representa el área en  $km^2$ , los coeficientes  $C_4$  y  $C_1$ , se encuentran tabulados para cada una de las 21 zonas. En el caso particular de la zona de estudio, la cual correspondería a la denominada región 14 (*Occidente de la Sierra Nevada*), según la clasificación HIMAT (1995) se tendría la Ecuación 3 con los valores de  $C_4=84.39$  y  $C_1=0.12$ .

$$Q_{2.33} = 84.39 A^{0.12} \quad \text{Ecuación 3}$$

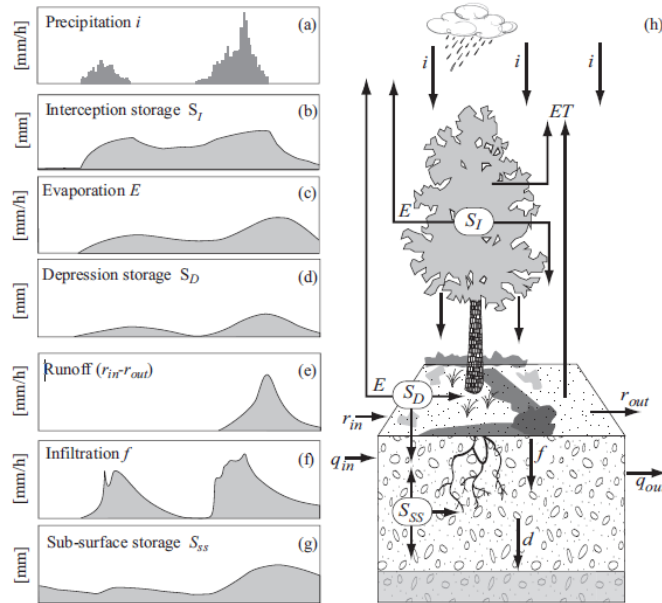
Finalmente, es posible deducir los valores de  $Q_t$  para  $Tr = 2, 2.33, 5, 10, 20, 50$  y  $100$  años mediante la Ecuación 4.

$$Q_t = Q_{2.33} A_t \quad \text{Ecuación 4}$$

Cabe recordar que la aplicabilidad de la ecuación está limitada a los afluentes de las fuentes principales del país, tales como los ríos Magdalena, Cauca, Atrato, Meta, Arauca, etc. (IDEAM, 1995)

Si bien la metodología presentada anteriormente puede considerarse como un método para caudales extremos asociados a períodos de retorno, la aplicación de esta en el hidrosistema estudiado sirve para evaluar comparativamente los caudales máximos reportados en el río Magdalena a la altura del municipio de Calamar (caudal de entrada a la zona de estudio) contra los máximos caudales de aporte esperados de las microcuencas del área de estudio, asociado a un cierto período de retorno. Lo anterior en aras de establecer la preponderancia o relevancia de estos últimos caudales en el estudio de manchas de inundación, por ejemplo.

Por otra parte, los estudios de balance hídrico y principalmente el balance hídrico de largo plazo (BHLP), constituyen otras herramientas importantes para el análisis hidrológico de zonas con información limitada. La Figura 3-2, resume las principales variables de la ecuación de balance hídrico aplicada a una parcela, se destaca: a) Lluvia total. b) Agua almacenada en la cobertura vegetal por interceptación. c) Pérdidas por evaporación desde la cobertura vegetal. d) Agua almacenada en las depresiones de la superficie e) Escorrentía superficial o neta en el área de estudio. f) Infiltración. g) Agua almacenada en la zona no saturada.



**Figura 3-2:** Algunos términos de la ecuación del balance hídrico de la interfase suelo – atmósfera – vegetación. Fuente: Adaptado de (Hingray, Picouet, et al., 2014)

Es apreciable la cantidad de variables que intervienen en el proceso y que requerirán ser establecidas o medidas para la adecuada aplicación del balance hídrico en una cuenca. Sin embargo, el BHL, permite simplificar notablemente las variables representativas del proceso, lo cual ocurre al fijar como escala temporal de análisis hidrológico 1 año, como mínimo, quedando de forma simplificada la Ecuación 5, donde, por ejemplo, la infiltración se descarta al ser mucho menor que las variables precipitación y evapotranspiración, en la escala de tiempo analizada.

$$Q = K(P - E)A$$

Ecuación 5

$Q$  es el caudal medio de esorrentía superficial ( $L^3/T$ ),  $P$  es la precipitación total anual ( $L$ ),  $E$  es la evapotranspiración total anual ( $L$ ),  $A$  es el área de estudio ( $L^2$ ),  $K$  es un factor de conversión; lo anterior, en unidades consistentes. Mayores detalles sobre la aplicación del BHL en Colombia se puede consultar en (Poveda, Vélez, et al., 2007; Poveda, 2004a).

### 3.1.1 Aplicación hidrológica propuesta para el área de estudio

Queda claro entonces que los estudios hidrológicos en zonas con poca instrumentación e información (fundamentalmente carencia de información coincidente entre precipitación y caudal a la salida de las microcuencas), como el caso del área de estudio, se ven limitados en una rigurosa implementación de los modelos lluvia – escorrentía, así como en el uso de otras técnicas hidrológicas alternativas, sobre todo, debido a la dificultad en las fases de calibración y validación. Sin embargo, la aplicación de los modelos lluvia escorrentía, junto con técnicas como el BHLP, resulta ser una muy buena alternativa para la estimación de los caudales medios aportantes por escorrentía superficial. Esto aún sin una rigurosa calibración, ya que, el empleo combinado de los dos tipos de métodos permite establecer órdenes de magnitud de los caudales aportantes por las cuencas involucradas en todo el hidrosistema y su variabilidad. De esta forma, en esta investigación se ha realizado para cada microcuenca:

- a. Un balance hídrico de largo plazo (BHLP) para establecer de forma aproximada el caudal medio de las cuencas aferentes a las ciénagas y al río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza, para estimar la magnitud de los caudales medios de escorrentía y compararlos con los caudales promedios que son transportados por el río Magdalena en el sector de Calamar (estación Calamar), una vez es derivado el caudal del Canal del Dique (estación Incora K7), obteniendo así una primera aproximación de los órdenes de magnitud de estos flujos de agua en todo el hidrosistema río Magdalena – ciénagas.

El BHLP en la zona de estudio se realizó con la secuencia metodológica descrita a continuación:

- Identificación de estaciones climatológicas con variable precipitación: En esta etapa se determinaron las estaciones con registros de precipitación con mínimo 20 años de registros, menor cantidad de datos faltantes y datos anómalos. Posteriormente, se agregaron valores totales anuales de precipitación para el período 1980 – 2011.
- Identificación de estaciones climatológicas con variable temperatura: Al igual que lo realizado para la variable precipitación, se seleccionaron las estaciones con valores de temperatura con mínimo 20 años de registros, menor cantidad de datos

faltantes y datos anómalos. Posteriormente, se establecieron valores promedio anuales de temperatura para el período 1980 – 2011.

- Determinación de la Evapotranspiración: Se estimó el valor de la evapotranspiración potencial promedio (ETP), aplicando el método de (Turc, 1955), propuesto en la herramienta computacional “*HidroSIG v4.0*” (Poveda, Vélez, et al., 2007).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{Si } P/L > 0.316 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$ETR = P \quad \text{Si } P/L < 0.316 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde, *ETP* es la evapotranspiración potencial promedio anual (mm/año), *P* es la precipitación media multianual (mm/año) y *T* es la temperatura promedio anual (°C). Al ser un método que sólo depende de datos de precipitación y temperatura se considera ideal su aplicación en la zona de estudio a partir de las estaciones climatológicas del IDEAM, referenciadas en el Capítulo 2. Es importante señalar que los datos puntuales de *P* y *T* fueron interpolados para toda la zona aplicando el método de Kriging ordinario, incluido en la herramienta *ArcGis v10.1*. La aplicación de este método de interpolación geoestadístico en variables climatológicas, como la precipitación, ha mostrado tener buenos resultados en comparación con otras metodologías de interpolación (determinística), y se encuentra ampliamente referenciado en la bibliografía científica; mayores detalles se pueden consultar en (Figuerola Ortiz, 2016; UNAL-MED, 2011). Mediante la aplicación de álgebra de mapas se realizan las operaciones necesarias para resolver la Ecuación 5, se estiman los valores de caudales por celdas y se realiza la agregación para la cuenca reportando el

---

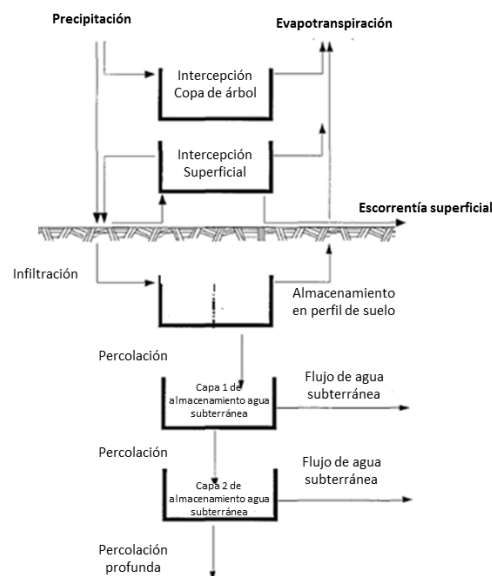
<sup>9</sup> **HidroSIG 4.0** potenciado por *MapWindow* (<http://poseidon.unalmed.edu.co/~hidrosig>) es un Sistema de Información Geográfica que ofrece una serie de herramientas para el procesamiento y análisis de información hidrológica y climatológica. (UNAL-MED, 2011).



caudal medio anual ( $L^3/T$ ). Este proceso se aplicó para cada uno de los años en el período comprendido entre (1980 – 2011), eliminando de la interpolación las estaciones sin registros.

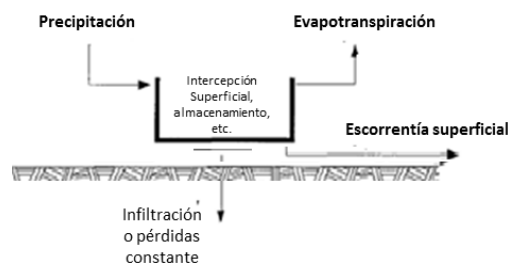
De otra parte, la implementación para cada microcuenca de un modelo lluvia escorrentía con resolución temporal diaria, permite establecer órdenes de magnitud y la variación de los caudales interanuales en las microcuencas de la zona de estudio, en las diferentes fases del ENOS (El Niño, La Niña) y año normal. El modelo hidrológico seleccionado corresponde a la herramienta computacional HEC-HMS, la cual, como fue indicado anteriormente, presenta gran versatilidad para la generación del modelo a partir de un Sistema de Información Geográfica (SIG), realiza análisis hidrológicos continuos en el tiempo y es una herramienta computacional de uso libre, entre otras ventajas. Adicionalmente, cualquier entidad podrá a futuro mejorar el modelo desarrollado, conforme a nueva información que pueda ser obtenida posterior a esta investigación. En la herramienta computacional HEC-HMS, el proceso de transformación de precipitación en escorrentía depende del tipo de modelación, de evento o extendida y así algunas variables son omitidas según la necesidad de la aplicación. Por ejemplo, cuando se realizan modelaciones con resolución temporal de evento, la evapotranspiración es ignorada; sin embargo, en la modelación extendida o continua, los procesos de evapotranspiración y almacenamiento de agua en el suelo y subsuelo, son especialmente requeridos.

La modelación extendida en HEC-HMS puede ser realizada de dos formas: a) A través del modelo de contabilidad de humedad en el suelo (SMA), por sus siglas en inglés (*Soil-Moisture Accounting*), el cual simula el movimiento vertical del agua utilizando almacenamientos o tanques para la intercepción de agua por vegetación, depresión en el suelo, infiltración y percolación (U.S. Army Corps of Engineers, 2000). Este proceso se resume en la Figura 3-3.



**Figura 3-3:** Esquema conceptual del algoritmo de contabilidad de humedad en el suelo (SMA por sus siglas en inglés), implementado en el modelo HEC-HMS. Fuente: Adaptado de (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).

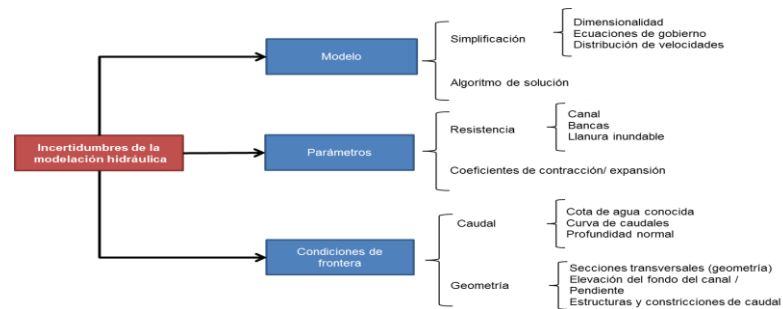
b) Cuando no es posible la obtención de toda la información requerida para la adecuada implementación del modelo SMA, presentado en el ítem a, HEC-HMS ofrece otra alternativa más simple para la estimación de la escurrentía superficial en la modelación extendida (modelación continua), la cual se realiza a través de un único tanque, donde se establece una capacidad de infiltración constante y sólo se puede generar escurrentía cuando la precipitación supera dicho umbral, mientras tanto se realiza el cálculo de la ETP en cada paso de tiempo. La Figura 3-4, presenta el esquema del modelo de un solo tanque en HEC-HMS.



**Figura 3-4:** Esquema conceptual modelo de pérdidas constantes, implementado en el modelo HEC-HMS continuo. Fuente: Elaboración propia

### 3.2 Modelación matemática en hidráulica

Los modelos hidráulicos tienen como objetivo el cálculo de la lámina de agua en el cauce, por lo cual reciben como insumo los caudales generados en las cuencas aferentes al cauce principal y que son obtenidos de los análisis hidrológicos previamente elaborados. Cuando se piensa en la delimitación de zonas inundables y zonas de riesgo, se deben tener en cuenta las fuentes de incertidumbre que se desprenden de la modelación hidráulica para identificar cual tiene mayor relevancia y poder así evaluar la confiabilidad y representatividad de los resultados obtenidos. La Figura 3-5 ilustra potenciales fuentes de incertidumbre de las modelaciones hidráulicas en canales abiertos, las cuales deben tenerse en cuenta tanto en la etapa de selección del modelo, como en la etapa de valoración de los resultados.



**Figura 3-5:** Posibles fuentes de imprecisiones en modelación hidráulica para delimitación de zonas inundables Fuente: Adaptado de (FEMA, 2009).

La física de los flujos de fluidos está bien entendida y es generalmente capturada por la formulación matemática de las ecuaciones de conservación de masa, energía y momentum. En la práctica general de la hidráulica de canales abiertos, el promedio de la velocidad en la profundidad es una buena representación de la velocidad del flujo. El flujo puede ser aproximado utilizando modelos en una dimensión ( $1D$ ), modelos en dos dimensiones ( $2D$ ) y modelos en tres dimensiones ( $3D$ ). Existen también los modelos Cuasi  $2D$  y los modelos  $1D/2D$ , estos últimos se caracterizan principalmente por realizar una aproximación ( $1D$ ) en el cauce principal y ( $2D$ ) en la llanura inundable. En todos estos modelos se puede considerar el análisis mediante flujo permanente cuando se establece un caudal invariante en el tiempo o mediante flujo no permanente cuando se utiliza como condición de entrada un hidrograma.

En las aproximaciones unidimensionales ( $1D$ ), la velocidad de flujo se asume que solo varía en la dirección de la pendiente longitudinal del cauce. La velocidad es promediada en la profundidad y en el ancho de la sección transversal. Se calcula una sola elevación de la superficie de agua y la profundidad de agua sobre todos los puntos de la sección transversal se determina trazando una línea horizontal en toda la sección. La planicie de inundación se delimita en el lugar en donde la línea de agua se intercepta con la línea de elevación del terreno (FEMA, 2009). Los modelos ( $1D$ ) son principalmente aplicables en zonas en donde el flujo principal se encuentra en la dirección longitudinal ( $x$ ), siendo esta suposición fundamentalmente correcta cuando las zonas o cauces tienen pendiente moderada o pronunciada; sin embargo, una zona de inundación delimitada a partir de la rigurosa implementación de un modelo ( $1D$ ) puede sugerir la máxima zona afectada, por lo cual, no debe descartarse *a priori* la implementación de estos modelos en zonas con baja pendiente, como es el caso de estudio aquí reportado. La modelación ( $1D$ ) ofrece en algunos casos importantes ventajas computacionales y permite la inclusión de almacenamientos (ciénagas, etc.), diques, puentes, entre otras estructuras.

Los modelos bidimensionales ( $2D$ ), conocidos también como modelos de aguas someras, calculan las componentes de velocidad en el plano horizontal ( $x$  e  $y$ ) y promedian la velocidad en la profundidad ( $z$ ). Estos modelos resuelven completamente las ecuaciones de Saint-Venant utilizando algoritmos numéricos que avanzan iterativamente en la solución sobre cuadrículas o triángulos. La solución de los flujos en dos dimensiones es computacionalmente más demandante, sin embargo, ofrece importantes ventajas con respecto a los modelos unidimensionales, como son la resolución más precisa de la elevación de la superficie de agua y la determinación directa de la llanura de inundación, a medida que avanza el cálculo. Un estudio comparativo entre modelos unidimensionales y modelos bidimensionales encontró que los modelos ( $2D$ ) tiene mayor precisión para determinar la magnitud y dirección de la velocidad (TRB<sup>10</sup>, 2006), este último es un elemento importante en la estimación del daño por inundación. El estudio de (TRB, 2006)

---

<sup>10</sup> The Transportation Research Board, 2006

también encontró que las diferencias entre modelos (2D) y (1D) son pequeñas en el canal principal, incrementan entre el canal y la llanura inundable y son mayores en las derivaciones. Estas divergencias entre el canal y la zona inundable resultan de la incapacidad de los modelos 1D para representar complejas características y fenómenos, tales como corrientes trenzadas, múltiples aperturas, etc. Por consiguiente, la elección del modelo puede afectar significativamente los niveles de inundación. FEMA (Federal Emergency Management Agency) recomienda hacer un mayor esfuerzo hacia el uso de los modelos de dos dimensiones (2D) cuando así lo justifiquen la geometría de la llanura aluvial, las vías preferentes de flujo y las estructuras existentes y previstas (FEMA, 2009).

Por otra parte, la modelación en tres dimensiones implica naturalmente una mayor demanda computacional que la de un modelo (2D) o (1D), previamente comentados, siendo el uso de este tipo de modelación bastante restringido a zonas y casos puntuales y zonas no muy extensas. La aplicación principal de este tipo de modelación está asociada al estudio de estructuras hidráulicas y modelación de cauces con fondo móvil, además del estudio del transporte de sedimentos (Di Baldassarre, 2012).

Cabe destacar que el uso de un modelo o software libre permite que tanto los modelos hidráulicos como sus resultados, sean fácilmente utilizados y apropiados por las entidades o en este caso Corporaciones Autónomas Regionales que tienen injerencia directa en la zona de estudio (el Bajo Magdalena). El uso de estos modelos libres permite mejoras en los mismos en función de una mejor calidad de información que puede ser generada *a posteriori* de esta investigación, por lo tanto, han sido priorizados en esta investigación. En la Tabla 3-3 se presenta el panorama de algunas herramientas computacionales para modelación hidráulica, comerciales y libres, consideradas potencialmente aplicables en el proyecto.

Para el desarrollo del componente hidráulico de esta investigación la selección de los modelos aplicables en la zona de estudio dependió, entre otros aspectos, de la relación entre los parámetros e información requerida por el modelo *versus* la información disponible en el área regional de estudio, la cual fue discutida en el Capítulo 2. Estos modelos resultan ser bastante versátiles al momento del analizar cauces fluviales,

permitiendo, entre otros aspectos, la implementación de estructuras hidráulicas como, vertederos, compuertas, almacenamientos y variadas condiciones de frontera, etc.

**Tabla 3-3:** Panorama de herramientas computacionales (modelación hidráulica) potencialmente aplicables en la zona de estudio.

Modelo	Descripción	Licencia	Referencias
ArcGis	Un SIG permite la modelación en OD basada en álgebra de mapas, no constituye un modelo físico	Comercial	(Di Baldassarre, 2012)
Sobek	Entorno integral para la modelación hidrodinámica 1D y 2D, desarrollado por Delft Hydraulics	Comercial	<a href="https://www.deltares.nl/en/software/sobek/">https://www.deltares.nl/en/software/sobek/</a>
Mike 11	Entorno integral para la modelación hidrodinámica 1D desarrollado por Danish Hydraulics Institute	Comercial	(Di Baldassarre, 2012)
Mike 21	Resuelve las ecuaciones de onda de superficie en 2D, desarrollado por Danish Hydraulics Institute	Comercial	(Di Baldassarre, 2012)
RiverFLOW-2D	Combinación de hidrología e hidrodinámica, transporte de fondo y transporte de contaminantes, en ríos, estuarios, costas y llanuras de inundación - desarrollado por Hydronia LLC	Comercial	(Lic, 2006)
FLO-2D	Modelo hidrodinámico para modelación 2D, es un modelo físico. Cuenta con un módulo hidrológico (lluvia - escorrentía).	Comercial	(Flo-2D, 2009)
River2D	Modelo hidrodinámico de aguas promediadas en la profundidad. Este modelo está adaptado al estudio de hábitat de peces. En total el modelo se compone de 4 programas, los cuales interactúan entre sí y deben ser aplicados de forma sucesiva. Primero se realiza el procesamiento de la información, luego se estudia la presencia de hielo, se realiza el trazado de la malla y se concluye con los cálculos de lámina de agua y velocidades.	Libre	(Steffler and Blackburn, 2002)
IBER	Modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre y régimen no permanente. El rango de aplicación abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo del transporte de sedimento, la modelación de la calidad de agua y el flujo de mareas en estuarios.	Libre	(Bladé, Cea, et al., 2012)
HEC-RAS	Diseñado para realizar modelaciones en 1D y 2D (recientemente), contiene módulos para análisis de canales en flujo permanente y no permanente, módulo de calidad de agua, módulo de transporte de sedimento y diseño de estructuras hidráulicas. Cuenta con la extensión HEC-GeoRAS con la cual puede realizarse el pre-proceso y el post-proceso.	Libre	(Brunner, 2016b; Brunner, 2016a)

### 3.2.1 Aplicación propuesta para el área de estudio

En esta investigación se han utilizado los modelos hidráulicos HEC-RAS (1D o 2D) y el modelo bidimensional Iber (2D), principalmente por ser software libre, ampliamente documentados, sin embargo, podría ser cualquier otro software; estos modelos en particular cuentan con extenso soporte teórico y aplicado. Las características de ambos modelos y los principios para el análisis de flujo en superficie libre se resumen a continuación:

- El modelo unidimensional HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) es un modelo ampliamente utilizado para análisis y diseño de canales naturales o artificiales, ver por ejemplo, (Horritt and Bates, 2002; Pappenberger, Beven, et al., 2005; Arbelaez, 2010), quienes entre otros reportan su uso. El modelo HEC-RAS simula la hidráulica del flujo para canales de cualquier tipo de sección transversal bajo flujo permanente y no permanente. Para el caso de flujo permanente el modelo calcula el perfil de flujo gradualmente variado de la corriente, solucionando la ecuación de energía, a través de la implementación del método del paso estándar (Brunner, 2016). La Ecuación 9 es la ecuación de energía y la Ecuación 10 representa las pérdidas por fricción y pérdidas localizadas en el modelo.

$$Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + he \quad \text{Ecuación 9}$$

$$he = L\bar{S}_f + C \left( \frac{\alpha V_2^2}{2g} - \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

En donde  $Z$  es el nivel del fondo del canal aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, denominado este término cabeza de posición,  $Y$  es la lámina de agua aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, denominado este término cabeza de presión,  $V^2/2g$  es la cabeza de velocidad aguas arriba (1) y abajo del tramo (2),  $he$  son las pérdidas de energía en el tramo, dividiéndose en pérdidas por fricción y pérdidas localizadas. Las pérdidas por fricción en el tramo  $L\bar{S}_f$  para flujo gradualmente variado en un tramo de longitud  $L$  del canal se pueden

expresar por medio de la ecuación de Manning (ver Ecuación 11),  $C$  representa el coeficiente de expansión o contracción,  $\alpha$  es el coeficiente de Coriolis que acompaña el término de velocidad en los extremos del tramo.

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning,  $V$  es la velocidad promedio en la sección transversal,  $R$  es el radio hidráulico.

En el caso del flujo no permanente HEC-RAS utiliza un modelo implícito para resolver la ecuación de continuidad para un volumen de control dado (ver Ecuación 12) y la ecuación de cantidad de movimiento o momentum (ver Ecuación 13).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Qv)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde  $A$  es el área de la sección transversal,  $Q$  es el caudal,  $v$  es la velocidad del agua,  $t$  es el tiempo,  $x$  es la distancia,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $S_f$  es la pendiente de la línea de fricción,  $z$  es la profundidad de la superficie del agua. En conjunto, estas dos ecuaciones se conocen como las ecuaciones unidimensionales de Saint-Venant, y dentro del modelo HEC-RAS son resueltas a través del esquema implícito de 4 puntos o esquema de caja, donde se utiliza la técnica desarrollada por Preissman para linealizar las ecuaciones. Más detalles del modelo para flujo no permanente pueden consultarse en (Brunner, 2016).

La implementación del modelo hidráulico ( $1D$ ) en la zona de estudio ofrece una importante ventaja computacional, teniendo en cuenta que la longitud a modelar del río Magdalena es de un poco más de 80 km (entre el K20 y K100), los caños principales de conexión río – ciénaga suman una longitud aproximada de 90 km (caño Renegado, caño Aguas Negras



y caño Clarín), y las ciénagas principales son alrededor de 30, donde se destacan el conjunto cenagoso del Atlántico, el complejo cenagoso Pajara y la CGSM.

- Iber, por otra parte es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios, desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (*Universidade da Coruña*), del Grupo de Ingeniería Matemática (*Universidade de Santiago de Compostela*), del Instituto Flumen (*Universitat Politècnica de Catalunya y Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria*) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (España). El modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí. Incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, de granulometría uniforme, por carga de fondo y por carga en suspensión (Bladé, Cea, et al., 2012).

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y el rozamiento superficial por viento. La Ecuación 14 es la ecuación de continuidad, la Ecuación 15 y la Ecuación 16 son las ecuaciones de momentum en el eje x e y, respectivamente que utiliza el modelo.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h U_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left( h U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (U_x U_y) \\ = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h U_y) + \frac{\partial}{\partial x} \left( h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (U_x U_y) \\ = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 16}$$

En donde  $h$  es la profundidad,  $U_x$ ,  $U_y$  son las velocidades horizontales promediadas en profundidad,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\rho$  es la densidad del agua,  $Z_b$  es la cota del fondo,  $\tau_s$  es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento,  $\tau_b$  es la fricción debida al rozamiento del fondo y  $\nu_t$  es la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, representada en la Ecuación 17 y la Ecuación 18 para los ejes  $x$  e  $y$ , respectivamente (Bladé, Cea, et al., 2012).

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}} \quad \text{Ecuación 18}$$

La modelación bidimensional apoya directamente la delimitación de zonas susceptibles a inundación en el área de estudio, permitiendo efectuar la comparación con el cauce histórico obtenido a partir de la dinámica fluvial.

Cabe anotar que la herramienta computacional HEC-RAS cuenta recientemente (2015), con un módulo para desarrollar modelación 1D/2D y/o 2D, el cual, puede eventualmente ser evaluado en la zona de estudio y comparando sus bondades y resultados con los obtenidos a partir del modelo Iber (Bladé, Gómez-Valentín, et al., 2012; Bladé, Cea, et al., 2012; Silva, 2015).

Se destaca adicionalmente que los modelos discutidos anteriormente (HEC-RAS e Iber), cuentan con herramientas que permiten integrarse en pre-proceso y post-proceso con un SIG.

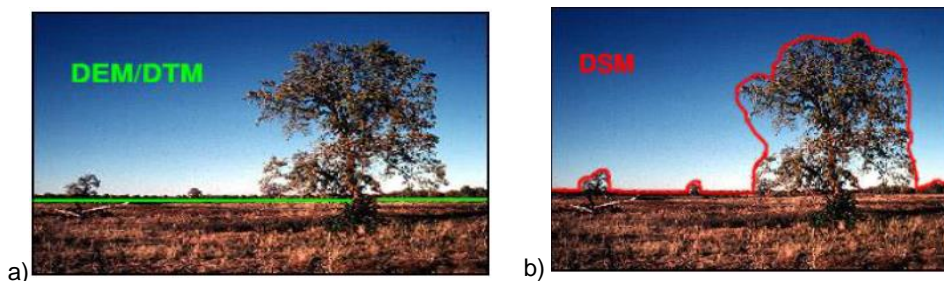
### 3.3 Representación digital del terreno y Sistema de Información Geográfica

Una gran discusión ha existido sobre el nombre a utilizar para referirse a la representación digital del terreno, por ejemplo, se habla de modelos digitales de terreno (*MDTs*), Modelos Digitales de Elevaciones (*DEMs*, por sus siglas en inglés *Digital Elevation Models*) y Modelos Digitales de Superficie (*MDS*). (Bedient, Huber, et al., 2008), por ejemplo, definen los *MDT* como cualquier representación digital del terreno tal como una serie de puntos, elevaciones, líneas de contorno y composiciones triangulares o red triangular Irregular (*TIN* por sus siglas en inglés), conocido también como un modelo digital de elevación (*DEM*); en otras palabras, se considera que el *MDT* es igual al *DEM*. Sin embargo, otros autores discrepan de esta definición y establecen una diferencia entre ambas terminologías de modelos; para (Felicísimo, 1994), “Un *MDT* es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”, con esta definición indica además que puede ser representada cualquier otra variable del terreno como la pendiente, etc., y no solo la elevación, señalando que cuando la variable a ser representada a partir del *MDT* es la elevación, se constituye un modelo digital de elevación (*DEM*). Por tanto, el *DEM* es un caso particular del *MDT* (Olaya, 2011).

Otro término comúnmente empleado en la literatura es el denominado modelo digital de superficie (*MDS*, o *DSM* por sus siglas en inglés, *Digital Surface Models*). Diferenciar los modelos de superficie es importante porque estos no necesariamente representan el terreno desnudo y pueden verse afectados por otras coberturas como es el caso de edificaciones en una zona urbana, la copa de los árboles en una zona rural e incluso las sombras y nubes. El *MDS* toma bastante relevancia con la aparición de nuevas tecnologías para la captura de información. Como por ejemplo tecnología radar, óptica, o LiDAR. Según (Wilson, 2011), entre las ventajas de utilizar LiDAR se incluyen la alta densidad de muestreo, la alta precisión vertical y la oportunidad de obtener en conjunto por lo menos dos versiones de la superficie: el dosel de la vegetación (primeras devoluciones) y la superficie del suelo (últimas devoluciones), que debe ayudar con la adecuada delimitación de cuerpos agua en áreas con densa vegetación (bosque) y en los entornos construidos (zonas urbanas). La Figura 3-6 resume las formas de representación

anteriormente descritas. La primera (a) es la representación del terreno correspondiente a *MDT* o *DEM*, y la segunda (b) es la representación de la superficie (*MDS* o *DSM*).

Descrito lo anterior, por considerarlo un término más amplio, haciendo referencia a cualquiera sea la forma de representar el terreno: puntos, líneas, triángulos (*TIN*) o rectángulos (*Raster*), en este documento se adopta la definición de *DTM* explícitamente para referirse al Modelo Digital de Terreno, en donde la variable representada es la elevación. Por otro lado, con relación al término *MDS* se considera que en zonas con poca y baja cobertura de árboles, edificaciones, etc., éstos si pueden representar el terreno, mientras que su uso depende del tipo de estudio. Por el contrario, en zonas con coberturas altas (zonas densas de árboles y edificaciones), el *MDS* debe ser considerado como una representación de la superficie y no del terreno natural o desnudo, lo anterior es importante teniendo en cuenta que la zona de estudio se caracteriza por tener poca densidad de árboles y una vegetación de baja altura asociada a manglares y cultivos.



**Figura 3-6:** Ejemplo de representación del terreno y representación de la superficie.  
Fuente: Adaptado de (Admah, 2012).

### 3.3.1 Modelos digitales de terreno (MDT) en la zona de estudio

Según (Bedient, Huber, et al., 2008) uno de los datos geoespaciales más utilizados es el terreno digital. Un modelo de terreno tradicionalmente se basa en contornos de igual elevación que definen las características de la cuenca, pendiente del canal y otras características. A través de un SIG, la representación del terreno puede ser contornos, elevación de celdas (también conocidas como *Raster DEM*), y red irregular triangular (*TIN*).

Además, las características de la cuenca, tales como pendiente y longitud de drenaje pueden obtenerse a partir de un modelo digital de terreno.

En el país se puede tener acceso a varias fuentes de información para representar el terreno; sin embargo, la cartografía oficial que está a cargo del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), se produce a escala 1:100.000 y 1:25.000. Cabe destacar, que los productos a escala 1:25.000 en algunas zonas sólo se encuentran para los años 1950 o anteriores y en formato análogo, mientras que la información a escala 1:100.000 es más reciente y la mayor parte en formato digital. Adicionalmente, existen fuentes globales de representación del terreno producto de misiones espaciales como son el *GTOPO30*, el *SRTM* (*Shuttle Radar Topography Mission*) y más recientemente la misión *ASTER GDEM* (*Advanced Space - borne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) y ALOS PALSAR (12.5 m), entre otros.

En la Tabla 3-4 adaptada de <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>, se presenta un resumen de los productos globales de representación del terreno destacando sus principales características. Se puede comentar que para efectos de mejor resolución espacial se tiene el ASTER GDEM (30 x 30 metros), mientras que el STRM (90 x 90 metros) tiene la ventaja de ser un sensor radar el cual representa mejor el terreno natural dado el alcance de la longitud de onda (bandas X, C, L, P); sin embargo, para decidir cuál información secundaria (MDT) debe emplearse como base en la zona de estudio, se realizó un análisis comparativo de valores de altura reportada por los MDT (SRTM y ASTER), encontrando que no existen diferencias significativas en las alturas arrojadas por estos modelos, debido a que las coberturas de la zona corresponden principalmente a vegetación de poca altura y zonas con poca densidad de vegetación, como fue comentado anteriormente. Por lo tanto, se ha tomado como información cartográfica complementaria principal el ASTER GDEM, ya que tiene una mayor resolución espacial y es más reciente, lo que mejora la representación de la zona de estudio.

**Tabla 3-4:** Resumen de productos globales para la representación de la tierra

Característica/sensor	ASTER GDEM	SRTM	GTOPO 30
Datos Fuente	ASTER	Radar	Desde las organizaciones que reportan datos DEM
Generación y distribución	MET/NASA	NASA/USGS	USGS
Año de Lanzamiento (público)	2009	2003	1996
Periodo de adquisición de datos	2000 - hasta hoy	11 días en el 2003	-
Resolución espacial	30 m	90 m	1000 m
Precisión	7 - 14 m	10 m	30m
Cobertura	83 grados norte -83 grados sur	60 grados norte - 53 grados sur	Global
Área de datos faltantes	Áreas sin datos ASTER debido a la nubosidad constante (suministrado por otro DEM)	Topográficamente zona empinada (debido a las características del radar)	Ninguno
Descarga	<a href="https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp">https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp</a> <a href="http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataproduct.htm">http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataproduct.htm</a> <a href="https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30">https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30</a>		

Por otra parte, los sistemas de información geográfica (SIG), representan una gran herramienta de gestión y manejo de información espacial. Existen diversas definiciones para los SIG dependiendo del enfoque. Una definición completa puede ser la propuesta por (Korte, 2001) y citada en (Olaya, 2011), en la cual “un SIG es un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados”.

La aplicación de los SIG en los recursos hídricos es variada, desde apoyar la modelación hidrológica e hidráulica en las etapas de pre-proceso o captura de información requerida por modelos hasta el post proceso, o representación de los resultados de modelaciones. Además, ayudan por ejemplo en la identificación de zonas susceptibles a desastre natural y zonas de riesgo. Algunos programas comunes de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se presentan en la Tabla 3-5 adaptada de (Bedient, Huber, et al., 2008) y complementada con información de SIG más recientes y de uso libre como son MapWindows<sup>11</sup> y SagaGIS<sup>12</sup>. En la actualidad, la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, cuenta con licencias para la utilización del Software ArcGIS de ESRI y ERDAS imagine. Sobre ArcGIS funcionan las extensiones GeoHMS y GeoRAS del *US ARMY*, módulos ampliamente utilizados para el pre-proceso y post-proceso de las herramientas

<sup>11</sup> [http://live.osgeo.org/es/overview/mapwindow\\_overview.html](http://live.osgeo.org/es/overview/mapwindow_overview.html)

<sup>12</sup> <http://www.saga-gis.org/en/index.html>

computaciones en hidrología, HEC–HMS y en hidráulica, HEC–RAS, anteriormente discutidas. Es así como en esta investigación se utilizará esta herramienta SIG para gestionar toda la información de la zona de estudio, realizar análisis espaciales y proveer los datos requeridos en la implementación y análisis de la zona de estudio.

**Tabla 3-5:** Sistemas de Información Geográfica populares, tabla adaptada de (Bedient, Huber, et al., 2008).

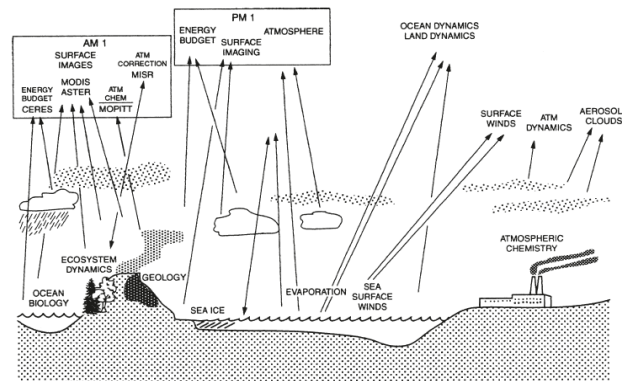
Software	Descripción	Módulos
<b>ArcGis Desktop</b>	Es una colección de productos creados para crear, editar, procesar, etc. información geográfica. Existen cuatro productos en la colección ArcGis desktop. Este software es distribuido por ESRI.	ArcGIS incluye otros productos que proporcionan mapeo extensivo. Importantes funciones para el procesamiento del terreno, imágenes satelitales y es útil para aplicaciones hidrográficas e hidráulicas ya que sobre el se encuentran las herramientas HEC-GeoHMS y HEC-GeoRAS del US ARMY
<b>ERDAS</b>	<b>ERDAS IMAGINE</b> soporta análisis espacial de imágenes desde fotografías aéreas hasta satelitales de sensores remotos. Además de ortorectificación y reclasificación de imágenes, provee soporte para formato raster y vector e interfaz con otros SIG. Es distribuido por Leyca Geosystems Geospatial Imaging, LLC, Norcross Georgia.	ERDAS Lenguaje macro (EML) soporta personalización. Incluye visualización de datos, generación de vistas 3D, integración de datos e importar/exportar rutinas. Soporte extensivo para datos de sensores remotos.
<b>Mapinfo</b>	Mapinfo profesional es un software que combina aplicaciones de negocios con aplicaciones geospaciales, incluyendo planificación de redes de comunicación, planificación de ciudades, respuesta a emergencias. Es distribuido por Mapinfo Corporation of Troy, New York.	Funcionalidad para formatos vector y raster. El análisis espacial está diseñado para negocios.
<b>IDRISI</b>	Un software popular para enseñanza e investigación. Distribuido por Clark Labs, Clark University, Worcester, Massachusetts.	IDRISI Andes es un software integrado de SIG y procesamiento de imágenes.
<b>Microstation</b>	Microstation Geographics provee herramientas para análisis y visualización de información espacial en formato vector y raster.	Microstation Geographics provee soporte para análisis, presentación, transformación de coordenadas, creación de datos, etc. Este software ofrece una interacción entre SIG y sistemas CAD.
<a href="#">MapWindow GIS11</a>	MapWindow GIS es un cliente GIS basado en Windows y Open Source (código abierto), con el que se puede visualizar, gestionar, editar y analizar datos, así como componer mapas para imprimir. (software libre)	Interfaz gráfica de usuario amigable, fácil visualización de muchos formatos vectoriales y raster, permite crear, editar y exportar datos espaciales. Realizar análisis espacial usando plugins (álgebra de mapas, análisis del terreno, Modelos hidrológicos, análisis de redes, etc.). La herramienta HidroSIG se encuentra sobre esta plataforma a partir de su versión 4.0
<a href="#">SAGA GIS12</a>	SAGA (Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos). Es un sistema de arquitectura modular en el cual se pueden visualizar datos espaciales, editar, etc. Creado por investigadores del Departamento de Geografía Física, Göttingen. En 2007, el centro del desarrollo SAGA se movió hacia Hamburgo, donde esta ahora en el Departamento de Geografía Física, Hamburgo.	Software libre. Recibe diferentes formatos, y permite realizar múltiples procesos incluidos en software (s) comerciales.

### **3.4 Breve descripción de los Sensores remotos y su aplicación en el estudio de los recursos hídricos**

Para Ritchie *et al.*, 1996, citado por (Schultz and Engman, 2001), “La Teledetección ha sido definida como la ciencia y arte de obtener información acerca de objetos, áreas, o fenómenos a través del análisis de datos adquiridos por un sensor que no está en contacto directo con el objetivo de la investigación”. Un sensor remoto, según (Menéndez and Núñez, 2009), se puede definir como un instrumento sensible, capaz de captar y evaluar objetos ubicados a la distancia; siendo en este orden de ideas las cámaras convencionales, los detectores infrarrojos, el radar y los sentidos de la vista, el oído y el olfato, ejemplo de sensores remotos. Esta definición resume el potencial de los productos derivados de estas tecnologías para ser aplicados en los recursos hídricos, siendo posible obtener información en zonas de difícil acceso, o zonas con información escasa para eventos determinados, etc.

Los datos provenientes de sensores remotos y sus productos derivados, brindan información cada vez más detallada de diferentes aspectos y procesos sobre la superficie terrestre, tales como: cobertura de suelo, agua, relieve, humedad del suelo, niveles, caudales, etc., convirtiéndose, en algunos casos, en la única fuente de información, en zonas con información limitada o escasa. Hoy en día, la imagen satelital o la información LiDAR (*Light Detection and Ranging*), constituyen quizás los productos de sensores remotos más utilizados para el estudio de los recursos hídricos, ya que permiten la generación de MDT más detallados y una mayor precisión en la identificación de coberturas, etc.; sin embargo, existen otros productos para la captura de otras variables ambientales y del ciclo hidrológico, un ejemplo es la misión EOS (*Earth Observing System*) implementado por la NASA para proveer importantes datos requeridos en estudios ambientales y de cambio climático, ver Figura 3-7.





**Figura 3-7:** Configuración gráfica planeada para la misión EOS. Fuente: Adaptado de (Campbell and Wynne, 2011).

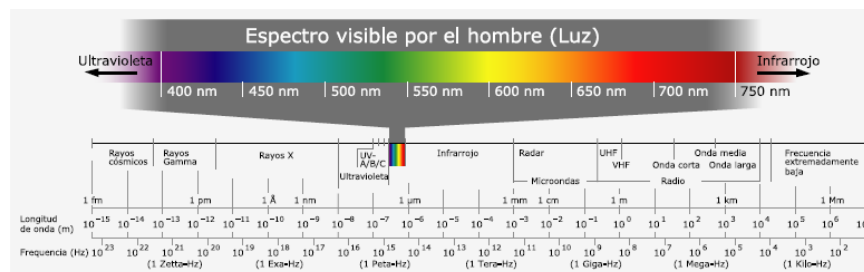
Una imagen satelital, representa la respuesta espectral de la cobertura ante un pulso de energía. Según (Menéndez and Núñez, 2009), “cuando la energía incide sobre una superficie de materia sólida, es reflejada, absorbida o transmitida. El grado de reflexión, adsorción o transmisión es función de las propiedades del material y de la longitud de onda. Algunos materiales tienen mayor capacidad de reflexión en cierta longitud de onda y transmiten o absorben en otra. Este fenómeno lleva a que un objeto tenga un “color” o un “tono” determinado sobre una imagen”. La Figura 3-8 resume el proceso de percepción remota a través de un sensor pasivo y basado en sus componentes principales se tiene:

1. Una fuente de energía electromagnética,
2. Un medio de propagación o transmisión de la energía (atmósfera),
3. La reflexión o emisión de la energía por parte del objeto,
4. La transmisión de la energía desde el objeto al sensor remoto a través del medio de propagación (sensor aerotransportado o en plataforma satelital).
5. Registro de la energía que llega al detector y su almacenamiento en forma análoga o digital (Menéndez and Núñez, 2009).



**Figura 3-8:** Esquema del proceso de percepción remota. Fuente: Adaptado de (Menéndez and Núñez, 2009)

La respuesta espectral de la superficie se clasifica según el espectro electromagnético, que es un rango de longitud de onda que es cubierto por la radiación electromagnética. (Ver Figura 3-9).



**Figura 3-9:** División del espectro electromagnético. Fuente: (Olaya, 2011)

Del espectro electromagnético se pueden destacar las siguientes regiones o rangos:

- Rayos  $\gamma$  < 0.03 nm.
- Rayos X (0.03nm – 3 nm)
- Ultravioleta (3 nm – 3  $\mu$ )
- Visible (3  $\mu$  - 0.7  $\mu$ ). Corresponde con las radiaciones que puede detectar el ojo humano. Las distintas longitudes de onda dentro de esta región son las responsables de los distintos colores que percibimos. Se encuentra el Rojo (Red), verde (Green) y azul (Blue), conocido como RGB por sus siglas en inglés.
- Infrarrojo cercano (0.7  $\mu$  - 1.3  $\mu$ )
- Infrarrojo medio (1.3  $\mu$  - 8  $\mu$ )
- Infrarrojo lejano o térmico (8  $\mu$  - 14  $\mu$ )
- Microondas (1 nm – 25 cm)

Un sensor remoto puede ser clasificado como pasivo o activo según la tecnología utilizada para la captura de la información. Dentro de los sensores activos encontramos aquellos como la tecnología radar, los cuales son capaces de emitir su propia energía, mientras que los sensores pasivos aprovechan la energía emitida por el sol principalmente y reciben la radiación de las coberturas.

La diferencia fundamental entre estos dos tipos de sensores radica en que los activos pueden funcionar en cualquier instante y no dependen de las condiciones atmosféricas (no

se ven afectados por la presencia de nubes) o el momento del día. Los sensores activos suelen trabajar en el rango de las microondas (frente a los sensores pasivos, que los hacen en las regiones del visible y el infrarrojo principalmente), ya que estas son capaces de atravesar la atmósfera en prácticamente todas las condiciones, presentando una ventaja frente a los pasivos en este aspecto, (Olaya, 2011).

Debido a las características anteriores, las imágenes provenientes de la tecnología radar son preferidas a la hora de representar coberturas de agua y manchas de inundación, dado que el agua refleja con gran facilidad y no se ven afectadas por las nubes (lluvia) que acompañan los eventos de inundación. La descripción anterior también sirve para tener mayor claridad sobre los productos derivados dependiendo de los sensores utilizados, por ejemplo, en lo que respecta a un modelo digital del terreno (MDT) el cual, corresponde a un producto de estas tecnologías; en el caso de la misión SRTM, la tecnología utilizada fue radar, mientras que en la misión ASTER responde a un sensor óptico. Inicialmente, por la longitud de onda del sensor radar, la cual permitiría una mayor penetración en la superficie y no se ve afectada por la atmósfera, esta tecnología se prefiere utilizar por ejemplo en zonas con vegetación densa, alta nubosidad, etc. Sin embargo, en zonas con poca cobertura como la región de estudio, el producto ASTER logra una aceptable representación del terreno.

La resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica de imágenes satelitales, corresponden a terminología de uso frecuente para establecer la aplicabilidad de un producto del sensor remoto. En forma resumida se puede decir que la resolución espacial de la imagen de satélite hace referencia al tamaño de pixel o celda para representar la respuesta de la superficie e indica el objeto más pequeño que puede distinguirse en la imagen. Así, entre más pequeño sea el *pixel* mayor resolución espacial tendrá la imagen. La resolución temporal representa para los satélites en órbita, cada cuanto el satélite pasa por la misma zona o región de análisis, es decir cada cuanto se puede contar con información del sensor en un mismo sector. La resolución espectral por su parte tiene que ver con la clasificación de la imagen captada según la longitud de onda del sensor y el espectro electromagnético, en el rango del visible, infrarrojo, microondas, etc.; recientemente comentado. Las imágenes en color contienen tres bandas,

correspondientes a las fuentes rojo, verde y azul, conocido como el *RGB* en el rango del visible, sin embargo, algunos sensores pueden tener bandas adicionales en el infrarrojo; con lo cual sería posible mejorar la resolución ya que cada banda cubriría un rango de frecuencias menor. Entre más bandas existan en el sensor mejor será la resolución espectral, siendo las imágenes *hiperespectrales* con más de cien bandas las que ofrecen la mejor resolución, permitiendo una caracterización espectral sumamente precisa (Olaya, 2011). Finalmente, la resolución radiométrica representa la capacidad del sensor para detectar las variaciones en la radiación espectral que recibe. Tanto las imágenes en blanco y negro como las imágenes en color trabajan con 256 niveles o 8 bits. Sin embargo, esta clasificación depende del sensor; por ejemplo, los sensores ópticos como LANDSAT y SPOT, trabajan con 256 niveles de codificación, mientras que las imágenes IKONOS son de 2048 niveles o 11 bits. La mayor resolución radiométrica conlleva en teoría a una mayor resolución. (Olaya, 2011).

La Tabla 3-6, resume algunas de las principales misiones científicas que producen la información, sensores y las características de los productos derivados de los mismos, destacando aspectos como resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica. Esta tabla se elaboró a partir de información obtenida en <http://gdsc.nlr.nl/FlexCatalog/catalog.html#> (base de datos de misiones espaciales para observación de la tierra).

Son múltiples las aplicaciones reportadas de los sensores remotos y sus productos derivados en el estudio de los recursos hídricos, teniendo en cuenta que su potencial aumenta por la facilidad de integración con otras tecnologías como los SIG. Es así, como los sensores remotos pueden ser de gran utilidad para la delimitación de áreas afectadas por inundaciones y permitir la evaluación de modelos hidráulicos (Di Baldassarre, 2012), delimitar la evolución temporal de cuerpos de agua tales como ciénagas, lagos, lagunas, etc., apoyar la geomorfología y dinámica fluvial a partir de estudios multitemporales e identificar zonas de movimientos en masa, etc. (Vargas Cuervo, 2015; Zhang, Guo, et al., 2015; Sarhadi, Soltani, et al., 2012). Sobre el recurso hídrico, (Gao, Birkett, et al., 2012), presentan una aplicación de sensores remotos para reconstruir las curvas de

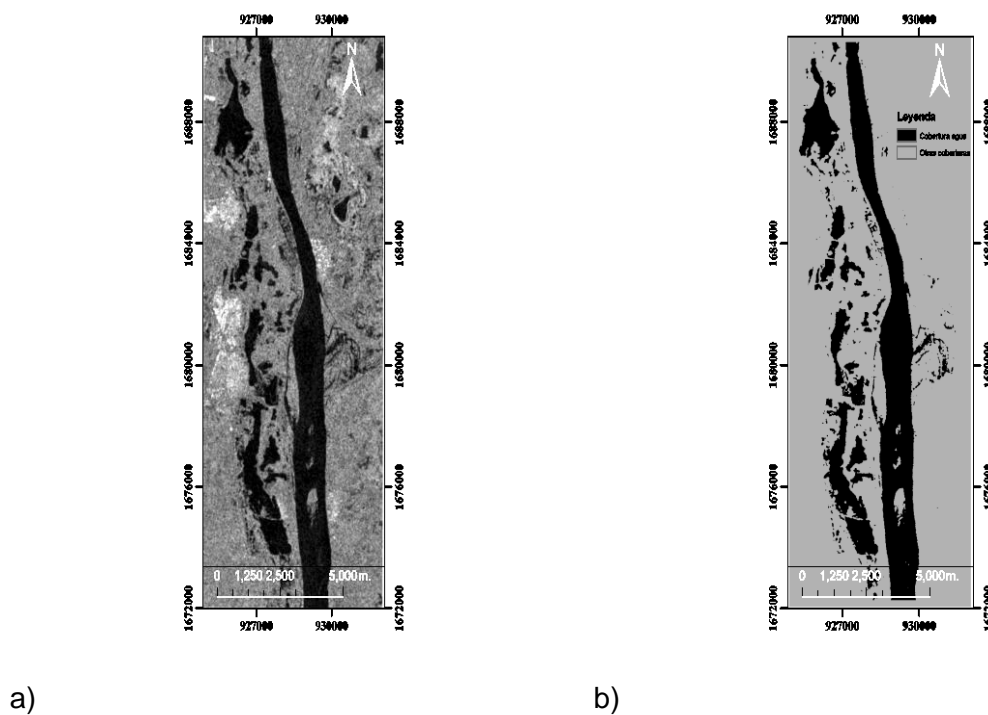
almacenamiento de varios embalses en los Estados Unidos a partir de un análisis multitemporal de las imágenes del sensor MODIS, los cuales al ser comparados con datos de campo arrojaron errores del 4 al 15%, considerados bastante aceptables, por citar un alcance.

**Tabla 3-6:** Principales misiones y sensores para observaciones de la tierra.

Satélite	Sensor óptico				Sensor radar				Resolución temporal		País	Inicio	Fin
	Resolución espacial		(Longitud de onda (nm))		Resolución (m)		Frecuencia (GHz)		Resolución (días)				
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx			
LANDSAT 1	80	80	480	1100					28	USGS Landsat	USA	Jul 23, 1972	Ene 6, 1978
LANDSAT 2	80	80	480	1100					18	USGS Landsat	USA	Ene 22, 1975	Ene 1, 1983
LANDSAT 3	80	80	480	1100					28	USGS Landsat	USA	Mar 5, 1978	Ene 7, 1983
LANDSAT 4	30	120	450	12500					28	USGS Landsat	USA	Jul 16, 1982	Dic 1, 1993
LANDSAT 5	30	120	450	12500					16	USGS Landsat	USA	Mar 1, 1984	Ene 1, 2013
LANDSAT 6	15	120	450	12500					16	USGS Landsat	USA		
LANDSAT 7	15	120	450	12500					16	USGS Landsat	USA	Abril 15, 1999	
LANDSAT 8	15	120	433	12500					16	USGS	USA	Feb 11, 2013	
Ikonos - 2	1	4	450	900					3	GeoEye	USA	Sep 24, 1999	
SPOT 1	10	20	500	890					26	SPOT - image	Francia	Feb 22, 1986	Nov 1, 2003
SPOT 2	10	20	500	890			0.4	2.4	26	SPOT - image	Francia	Ene 22, 1990	
SPOT 3	0	20	352	1104			0.4	2.4	26	SPOT - image	Francia	Sep 26, 1993	Nov 14, 1996
SPOT 4	0	1000	349	1750			0.4	2.4	26	SPOT - image	Francia	Mar 24, 1998	
SPOT 5	5	1000	450	1750			0.4	2.4	26	SPOT - image	Francia	May 3, 2002	
SPOT 6	1.5	6	455	890					1	CNES	Francia	Sep 9, 2012	
SPOT 7	1.5	6	455	890					1	CNES	Francia	Jun 30, 2014	
SRTM	40	40	450	750	30	30	5.3	9.6		NASA	Alemania, Italia, USA	Feb 11, 2000	Feb 22, 2000
Quickbird 2	0.6	2.4	450	900					3.5	Digital globe	USA	Oct 18, 2001	
Radarsat - 1					8	100	5.3	5.3	24	CSA	Canada	Nov 4, 1995	
Radarsat - 2					0	100	5.41	5.41	24	CSA	Canada	Dic 14, 2007	
RapidEye	6.5	6.5	440	850					1	RapidEye	Alemania	Agos 29, 2008	
ERS - 1	1000	1000	1450	12500	0	50	5.3	36.5	35	ESA	Europa	Jul 17, 1991	Mar 10, 2000
ERS - 2	1000	4000	237	12500	0	50	5.3	36.5	35	ESA	Europa	Abr 21, 1995	Sep 5, 2011
Worldview - 1	0.5	0.5	400	900					1.7	Digital globe	USA	Sep 18, 2007	
Worldview - 2	0.5	0.5	400	1040					1	Digital globe	USA	Dic 31, 2009	
Worldview - 3	0.3	30	400	2365					1	Digital globe	USA	Ago 13, 2014	
NOAA - 19	0	10000	160	14950	0	50	23.8	190.81		NOAA	NOA/NESDIS USA	Feb 11, 2009	
Aqua Mission (EOS/PM-1)	250	20000	300	125000	5	40	6.93	183.31	2	NASA	USA	May 4, 2002	
Terra Mission (EOS/AM-1)	15	22000	300	125000					16	NASA	USA	Dic 18, 1999	

En la presente investigación los productos derivados de sensores remotos han servido de apoyo a los análisis de dinámica fluvial, delimitación de coberturas y como patrón de comparación para la evaluación de las modelaciones hidráulicas realizadas en la zona de estudio (Di Baldassarre, Schumann, et al., 2009; Horritt and Bates, 2002; Dutta, Teng, et al., 2013; Mason, Bates, et al., 2009). Hubieran podido ser utilizados también para determinar las curvas de almacenamiento de ciénagas, sin embargo, esto requeriría un multitemporal de imágenes en las ciénagas y un MDT con gran resolución espacial, lo cual condiciona esta aplicabilidad por lo limitada de la información que fue posible adquirir para la zona de estudio. Las imágenes satelitales fueron analizadas con ayuda del Software especializado *ERDAS Imagine* versión 2011, el cual permite realiza el procesamiento de imágenes en forma supervisada y no supervisada (ver Tabla 3-5) y la herramienta SIG (*ArcGIS v10.1*) anteriormente referenciada, ambos con licencias en la UNAL Bogotá.

El proceso para una clasificación supervisada de coberturas en una imagen satelital se basa en la elección de las bandas espectrales de la imagen a clasificar, definición de número de clases espectrales, selección de los criterios de similitud y algoritmos de agrupación de los ND (Nivel Digital) (Posada, 2006); básicamente se requiere de un entrenamiento de las coberturas. Mientras que, para una clasificación no supervisada es el software el que agrupa las coberturas de acuerdo a su ND (nivel digital). En la Figura 3-10 se aprecia un ejemplo de una imagen clasificada para el sector comprendido entre las ciénagas El Convento y Ponedera, de la zona de estudio, en la cual se destaca sólo la cobertura agua. Nótese la gran precisión en la representación de la cobertura agua obtenida de la imagen Radarsat 2, el cual es un sensor activo, con resolución espacial de 12.5 x 12.5 m.



**Figura 3-10:** a) Imagen 22/11/2010, sensor Radarsat 2, (b) Imagen 22/11/2010, resultado de la clasificación supervisada sobre una máscara o fondo para destacar la cobertura de agua hacia la margen izquierda.

### 3.5 Evaluación de la modelación hidráulica utilizando imágenes de satélite

Evaluar el desempeño de las modelaciones hidráulicas a partir de la comparación de sus resultados contra la extensión de la mancha de inundación registrada en una imagen de satélite clasificada, es una alternativa ampliamente investigada, cuya aplicación resulta de mucha ayuda en zonas con información limitada o escasa, en donde no es posible contar con información coincidente de niveles y caudales en el cauce, de tal forma que se pueda aplicar un riguroso protocolo de modelación, incluyendo las fases de calibración y validación, ver (Aronica, Bates, et al., 2002; Horritt and Bates, 2001; Horritt and Bates, 2002; Pappenberger, Beven, et al., 2005; Di Baldassarre, Schumann, et al., 2009; Amador,

2013). Llevar a cabo la comparación de las manchas es comúnmente una actividad visual que adolece de subjetividad. Por ello es deseable complementar este análisis visual con algunos estadísticos que ayudan a cuantificar el grado de ajuste de la información espacial, basado bien sea en la comparación de polígonos que definen los límites de la inundación o en un mapa raster (MARM, 2011). De acuerdo con (Mason, Bates, et al., 2009; García-Pintado, Mason, et al., 2015), un método tradicional para analizar el desempeño de un modelo determinístico de inundación, cuando se encuentran disponibles datos de sensores remotos de la extensión de la inundación, es comparar la extensión de la inundación simulada mediante la aplicación del modelo, con la observada.

(Aronica, Bates, et al., 2002; Horritt and Bates, 2002), describen la medida de desempeño “ $F$ ” mediante la función objetivo formulada en la Ecuación 19, mientras que (Di Baldassarre, Schumann, et al., 2009; Amador, 2013), utilizan una variación de la Ecuación 19, para el cálculo de  $F$ , la cual se presenta en la Ecuación 20.

$$F = \frac{A}{(A + B + C)} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$F = \frac{(A - B)}{(A + B + C)} \quad \text{Ecuación 20}$$

En donde  $A$  es el tamaño de la zona húmeda que es correctamente representada por el modelo,  $B$  es el área mojada simulada que se observa seca (exceso de predicción), y  $C$  es la zona húmeda que no representó adecuadamente el modelo (baja predicción). El valor de  $F$  varía entre 0 y 1 en el caso de la ecuación 1, y entre -1 y 1 en el caso de la ecuación 2. En ambos casos, el mejor ajuste se obtiene con un valor de  $F$  igual a 1.

(MARM, 2011) propone calcular el estadístico *Kappa*, el cual utiliza la valoración de mapas lógicos [0,1], donde el valor 1 representa agua y 0 otras coberturas. Este estadístico mide la relación entre el nivel de acuerdo observado [ $P(O)$ ] sobre el mínimo nivel de acuerdo posible [ $P(E)$ ], respecto al máximo nivel de acuerdo posible (Ecuación 21 a Ecuación 23).



El valor máximo del estadístico *Kappa* es 1 y el valor mínimo -1. (MARM, 2011) recomienda además el uso del valor del parámetro *K* límite ( $K_{LIM}$ ) cuando se utiliza este estadístico, el cual está relacionado con el estadístico “*F*” mediante la Ecuación 24, considerando un valor satisfactorio para valores de  $K_{LIM} \geq 0.90$ , lo cual correspondería a un valor “*F*” de 0.82.

$$K = \frac{P(O) - P(E)}{1 - P(E)} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$P(O) = \frac{n_{ss} + n_{AB}}{n_T} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$P(E) = \frac{n_B n_A + (n_{ss} + n_B - n_{AB})(n_{ss} + n_A - n_{AB})}{n_T^2} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$K_{LIM} = \frac{2F}{1 + F} \quad \text{Ecuación 24}$$

En las ecuaciones anteriores,  $n_A$  es el número de celdas dentro del contorno en el mapa A,  $n_B$  el número de celdas dentro del contorno en el mapa B,  $n_{AB}$  el número de celdas que están dentro del contorno en ambos mapas,  $n_{ss}$  el número de celdas comunes que se encuentran fuera del contorno y  $n_T$  el número de celdas existentes en el dominio total abarcado por los mapas.

En esta investigación, otra aplicación relevante de los sensores remotos incluyó el análisis de la geomorfología y la dinámica fluvial específicamente aplicada al río Magdalena, con la cual se realizó la delimitación de zonas susceptibles a inundación, zonas de flujo preferente y llanuras de inundación. Con la delimitación histórica del cauce fue posible, además de establecer las zonas de flujo preferente, obtener las zonas de orillas con mayor actividad y la envolvente de orillas máximas identificadas, también la dinámica de los cuerpos lenticos. Los resultados del cauce histórico posteriormente se han contrastado con los obtenidos de la modelación hidráulica, analizando las discrepancias y similitudes encontradas, en aras de establecer zonas inundables a partir de un criterio conjunto.

Finalmente, para lograr la integración de la información primaria y secundaria existente, la aplicación de la modelación matemática en hidrología e hidráulica propuesta y los resultados de los análisis de la dinámica fluvial en la zona de estudio, se ha establecido una metodología general y dentro de ésta, una propuesta para la calibración de modelos hidráulicos a partir de imágenes satelitales. Esta metodología se detalla en el ítem 3.6 y su aplicación es el soporte del Capítulo 4 de este documento.

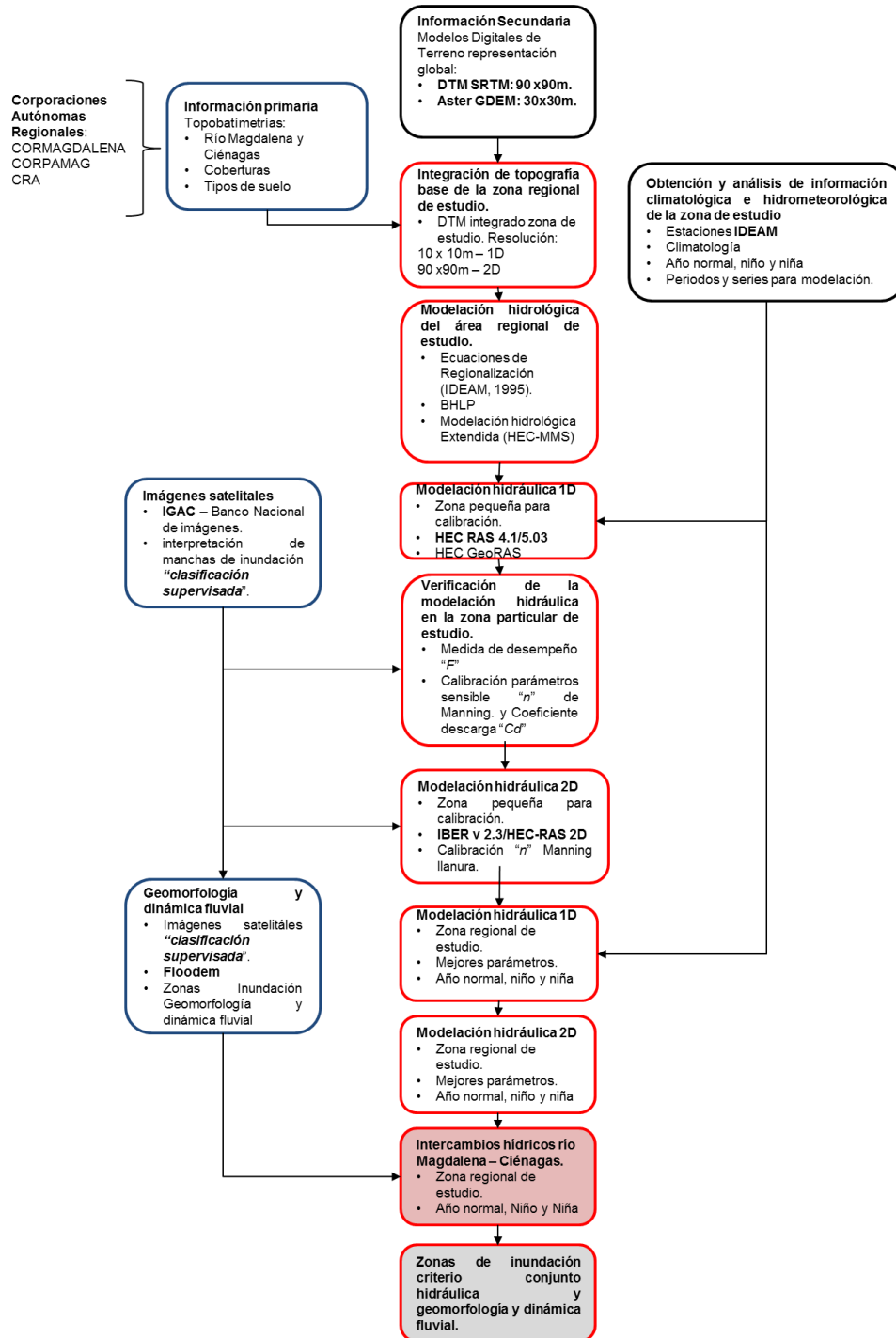
### **3.6 Marco metodológico y procedimental aplicado para el estudio hidrológico e hidráulico del Bajo Magdalena**

La Figura 3-11, resume el procedimiento propuesto e implementado para lograr establecer los intercambios hídricos y las zonas susceptibles de inundación, bajo distintos escenarios de caudales en el Bajo Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza (Barranquilla), según lo discutido a lo largo de este Capítulo.

El proceso se inicia con la identificación de las entidades que para la zona de estudio suministran información referente a: precipitación, caudales, topografía, batimetrías, coberturas, imágenes satelitales, etc.; luego se realiza la integración de la información cartográfica primaria y secundaria, con la cual fue posible generar el MDT integrado de la zona de estudio. La integración de la información se debe realizar teniendo como criterio una misma resolución en todos los productos, en caso de no ser posible, se integra la información teniendo como referencia la información con menor resolución, dado que, esto garantiza una mayor validez de la información generada. Posteriormente, es abordado el análisis hidrológico de la zona, donde se ha implementado primero un balance hídrico de largo plazo (BHLP) con el cual se establecen en todas las cuencas aferentes al hidrosistema los caudales con agregación anual, seguidamente la modelación matemática utilizando HEC-HMS (modelación extendida), determinando así los caudales de escorrentía superficial con agregación diaria, para el año normal, año Niño y año Niña, previamente establecidos. Por otra parte, se determina el cauce máximo a partir del análisis de la dinámica fluvial y la geomorfología, utilizando información de sensores

remotos y SIG. Luego se realiza el estudio hidráulico, en el cual, primero se implementa una modelación matemática para una zona piloto, en aras de aplicar una metodología de calibración de los parámetros sensibles de la modelación hidráulica " $n$ " Manning y " $C_d$ " Coeficiente de descarga, comparando los resultados de la mancha de inundación modelada y la mancha de inundación reportada por una imagen satelital previamente clasificada, la metodología de calibración propuesta se resume en la Figura 3-13. Una vez se ha establecido la mejor combinación de parámetros, se aplica la modelación hidráulica a la zona completa para los escenarios: año normal, año Niño, año Niña, y se reportan los intercambios hídricos. Finalmente, las zonas susceptibles de inundación en el Bajo Magdalena, se obtienen de cruzar los resultados de geomorfología y dinámica fluvial con los resultados de la modelación matemática en hidráulica.

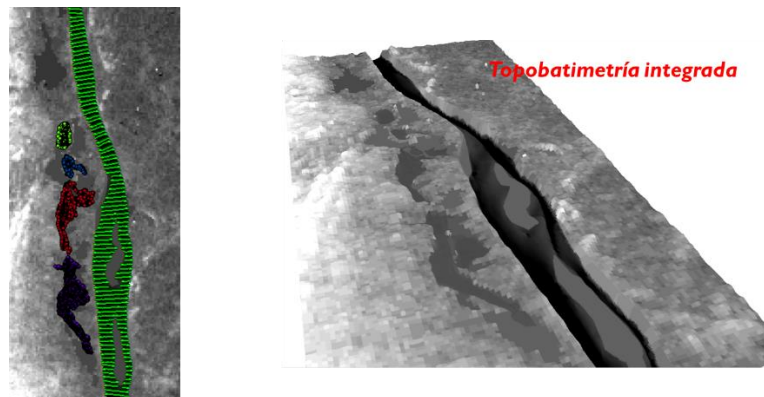
Esta propuesta metodológica, ofrece alternativas para el adecuado estudio de hidrosistemas complejos con información limitada, principalmente. Su aplicación puede ser regional o local según sea el problema a resolver y la calidad de los resultados estará ligada a la calidad de la información disponible. Sin embargo, al estar basada en productos satelitales, ofrece grandes posibilidades de implementación en regiones del país donde históricamente ha sido difícil la medición de campo y por tanto no se cuenta con extensas series de datos sobre la fuente hídrica. Otro valor agregado de esta propuesta metodológica, es la posibilidad de implementar cualquier tipo de herramienta computacional con que se cuente, destacando que el uso de software libre facilitaría la implementación. Quizás, la limitante más marcada de la propuesta metodológica se deba a la necesidad de contar con información satelital inicial y multitemporal, para acometer las etapas de calibración y validación de los resultados; sin embargo, el acceso a productos de sensores remotos libres es cada vez más frecuente y reduce la dificultad de la adecuada implementación de esta propuesta metodológica, la cual puede seguir siendo robustecida.



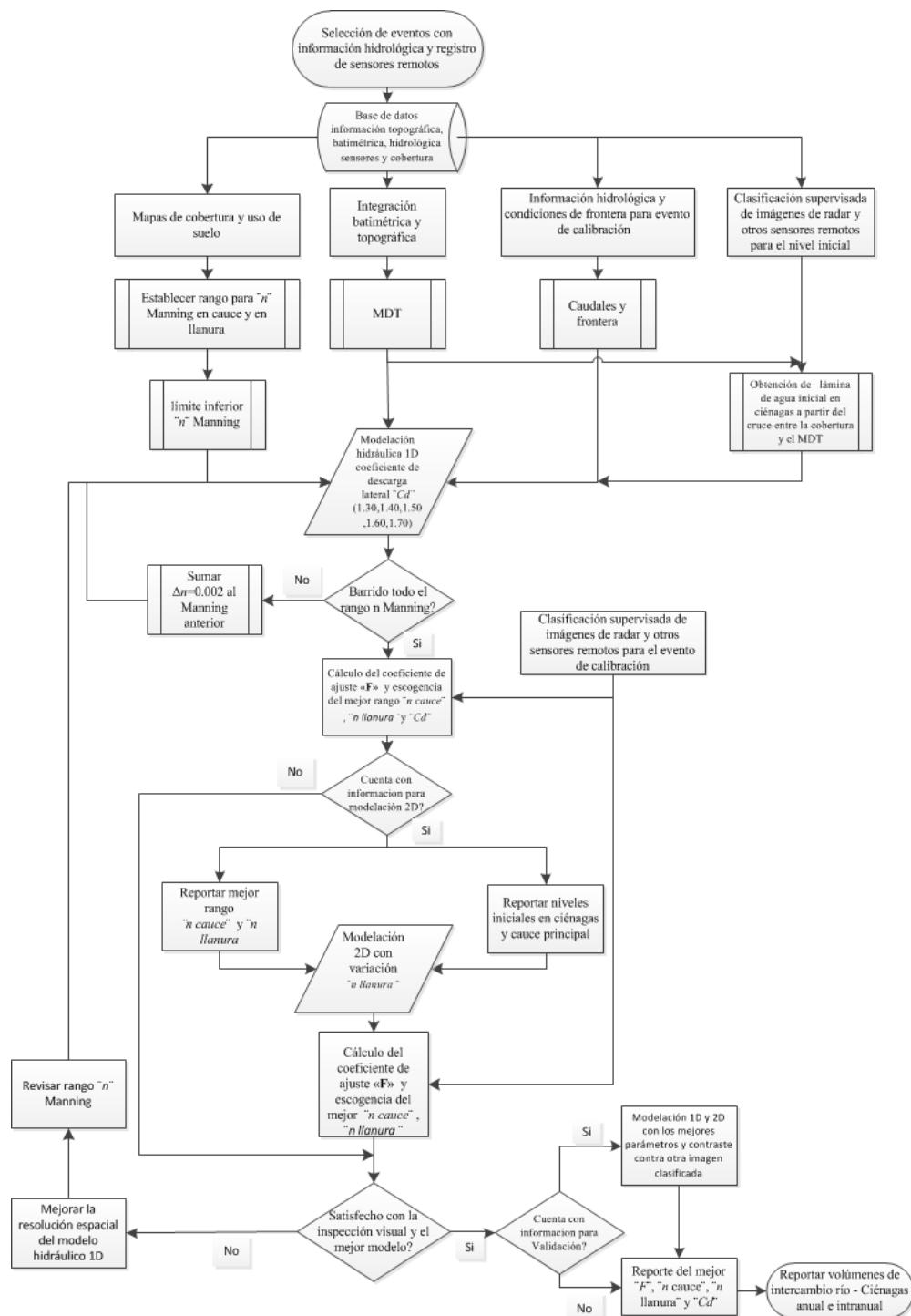
**Figura 3-11:** Esquema general del proceso metodológico propuesto e implementado en esta investigación.

### 3.6.1 Propuesta metodológica para la calibración de un modelo hidráulico en zonas con información limitada.

Esta secuencia metodológica se detalla en la Figura 3-13. Se inicia con la búsqueda de toda la información referente a la batimetría del cauce en el sector analizado y su combinación con información topográfica, de acceso libre (MDT) para obtener las mejores características topobatimétricas del cauce y de la llanura inundable (ver Figura 3-12), se destaca que, en este proceso la resolución del MDT utilizado resulta de fundamental importancia en los resultados obtenidos, pues a mayor resolución espacial del MDT se tiene mayor precisión en la delimitación de la inundación, pero se requerirá de un mayor esfuerzo computacional; siendo lo ideal buscar un balance adecuado entre ambos aspectos (MARM, 2011; Werner, 2001). Cabe mencionar que la información hidrológica (caudales y niveles, de entrada y salida), debe ser coincidente en tiempo con las imágenes satelitales.



**Figura 3-12:** MDT representación global (ASTERGDEM 30 x 30m) y topobatimetría integrada del cauce principal y cuerpos de agua (ciénagas) de un sector del costado occidental de la zona de estudio.



**Figura 3-13:** Propuesta metodológica para la calibración y validación de un modelo hidráulico en zonas con intercambio río-ciénagas, a partir de productos derivados de sensores remotos.

La primera fase de la metodología propuesta en la Figura 3-13 requiere por lo menos de una imagen de satélite, inmediatamente anterior a la fecha de inicio del análisis hidráulico, sobre la cual se debe realizar una clasificación supervisada de la cobertura de agua. El resultado de esta clasificación se convierte a formato vector (polígono) para ser posteriormente cruzada con los niveles del terreno del MDT y así poder establecer, de forma aproximada, las condiciones iniciales de los niveles de agua para el modelo hidráulico; todo lo anterior corresponde al pre-proceso.

Con la información hidrológica de caudales y niveles a la entrada y salida del sistema y una estimación inicial de los coeficientes de rugosidad, efectuada a partir de información secundaria, se implementan las modelaciones hidráulicas utilizando un modelo hidráulico *1D* (unidimensional). La implementación del modelo hidráulico requiere la generación de diferentes escenarios en donde se destaca la variación de los diferentes parámetros sensibles del modelo, con fines de calibración de los mismos a partir de la información disponible; por ejemplo, en el caso de un modelo *1D*, aplicado a una zona con desborde lateral hacia ciénagas, como es el caso de la aplicación aquí reportada, se requerirá de variaciones en el coeficiente de rugosidad “*n*” de Manning tanto en el cauce principal ( $n_c$ ) como en la llanura aluvial ( $n_{ll}$ ) y variaciones en el valor del coeficiente de descarga del vertedero lateral “*Cd*”, cuando esta estructura se utiliza en el modelo para representar el intercambio de caudales desde el cauce hacia las ciénagas o viceversa. La razón para proponer el uso de un modelo unidimensional (*1D*) en esta etapa de la propuesta metodológica radica en que su menor demanda de datos y tiempo computacional permite analizar, obviamente de forma limitada, los valores de los parámetros y los resultados generales de la simulación, pero fundamentalmente permite generar las condiciones de entrada a un modelo hidráulico bidimensional (*2D*) de la zona analizada, en caso de contar con la información necesaria para efectuar una modelación de este tipo.

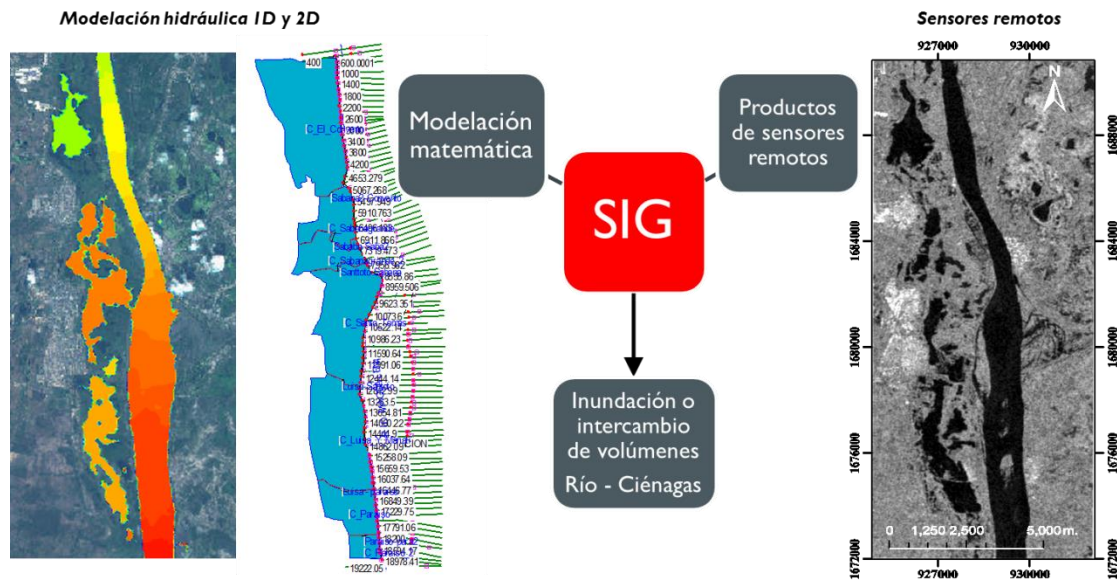
La propuesta metodológica seguidamente plantea evaluar los resultados de la modelación hidráulica efectuada para la fecha escogida como de calibración, es decir una fecha posterior al inicio de las modelaciones, para la cual se disponga de productos de sensores remotos y en la cual se diferencie con relativa facilidad la cobertura de agua de otras coberturas. Para analizar los resultados de las simulaciones hidráulicas con respecto a la

mancha de inundación y así tener un criterio objetivo para la obtención de los mejores valores de los parámetros sensibles, se propone evaluar el factor de desempeño “ $F$ ” (discutido en el ítem 3.5 de este Capítulo) que relaciona las coincidencias o no en la representación de la mancha de agua entre las simulaciones del modelo hidráulico (1D) y la clasificación supervisada para la fecha de calibración, destacando que la evaluación se realiza a la resolución espacial de la imagen satelital y para la llanura inundable. Esto último con el objetivo de ser más críticos en la evaluación de los resultados del modelo hidráulico, ya que al incluir en la evaluación la coincidencia de la mancha en el cauce se considera que no se estaría evaluando adecuadamente la respuesta hidráulica del modelo, pues aumentaría significativamente el valor del factor de desempeño “ $F$ ”, pudiéndose enmascarar deficiencias en la representación de la mancha de inundación. Con esta estrategia se definen los mejores valores del coeficiente de rugosidad “ $n$ ” de Manning en el cauce principal y “ $Cd$ ” en la estructura de derivación; adicionalmente, se obtienen los niveles en el cauce y en las ciénagas con los cuales se alimenta ahora el modelo hidráulico (2D), en caso de contar con la información requerida para hacer una modelación de este tipo.

En el modelo hidráulico (2D) se generan diferentes escenarios, variando ahora el coeficiente de rugosidad en la llanura aluvial, mientras que para el cauce se varía el coeficiente de rugosidad en el rango de los mejores “ $F$ ” obtenidos como resultado de la modelación 1D, se evalúan nuevamente los resultados obtenidos a partir del factor de desempeño “ $F$ ” en la llanura de inundación y se establecen los valores de los parámetros que generan los mejores resultados. Así, en este momento se tendrían las combinaciones de los parámetros rugosidad en el cauce ( $n_c$ ), coeficiente de descarga en la estructura de derivación de caudales ( $Cd$ ), y rugosidad en la llanura aluvial ( $n_{ll}$ ) que generan el mejor valor del factor de desempeño “ $F$ ”. Para la validación del modelo (1D y/o 2D) se propone realizar una nueva modelación hidráulica con los mejores parámetros encontrados, evaluando los resultados de la misma forma antes descrita, contra otra imagen clasificada para la zona, de fecha diferente. Finalmente, se reportan los volúmenes de agua de intercambio en el sistema río-ciénagas y/o la mancha hidráulica de inundación utilizando el modelo 1D, mientras que el modelo 2D se utiliza para apoyar la descripción y el



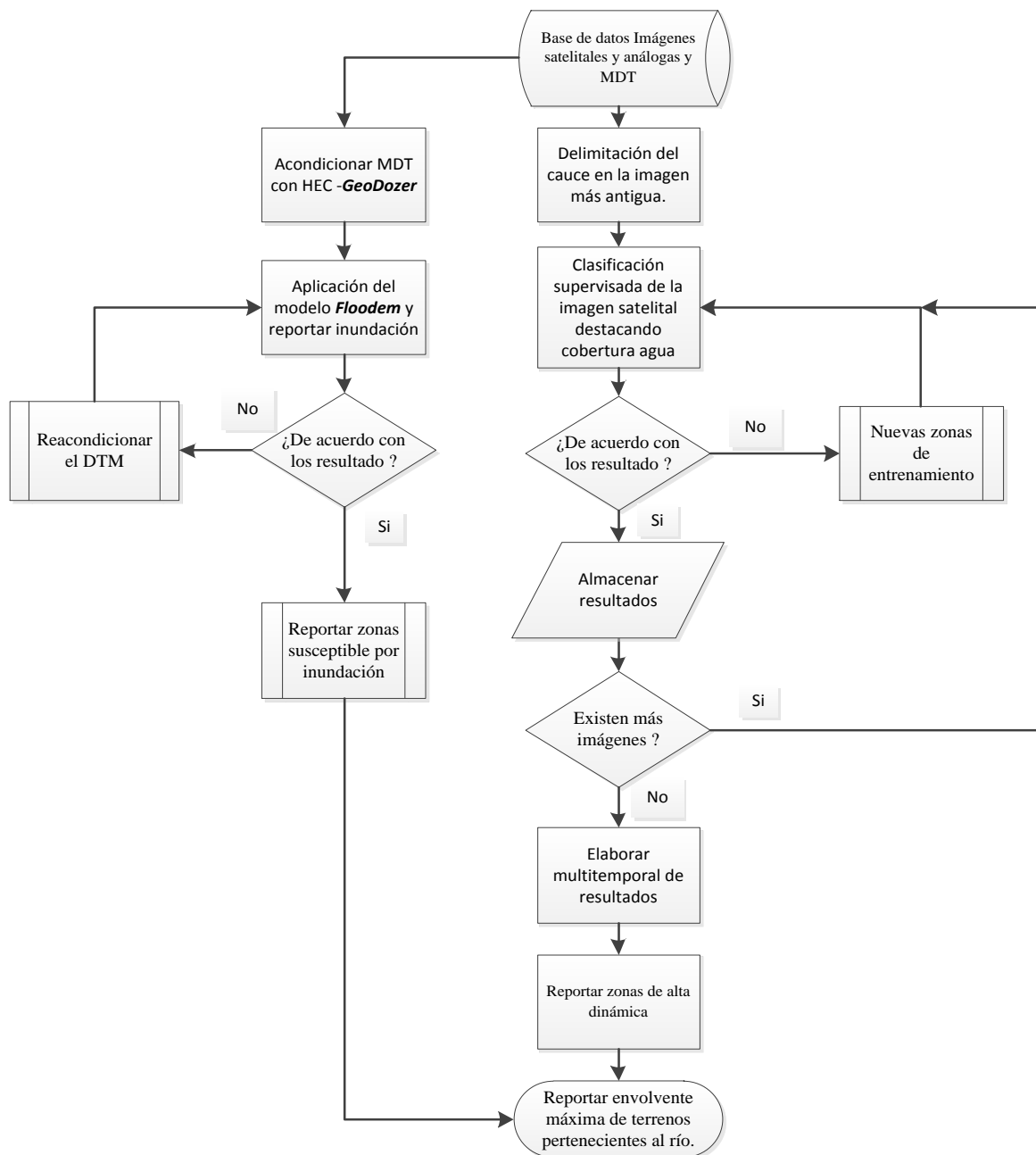
entendimiento hidrodinámico en las ciénagas y/o la llanura inundable, ya que este permite establecer la distribución en el plano horizontal (x e y) de la velocidad. La Figura 3-14 resume la metodología propuesta.



**Figura 3-14:** Síntesis general de la metodología propuesta para la calibración de modelos hidráulicos a partir de productos derivados de sensores remotos.

### 3.6.2 Secuencia metodológica para el análisis de la dinámica fluvial.

La dinámica fluvial en conjunto con las características geomorfológicas de la zona, representan un complemento a los resultados obtenidos mediante la modelación matemática en hidráulica y apoya notablemente la delimitación de las zonas inundables. Es importante destacar que la dinámica fluvial y la secuencia a continuación presentada se basan principalmente en el uso de productos satelitales. La Figura 3-16 resume la secuencia procedimental seguida para la obtención del cauce histórico y la dinámica fluvial de la zona de estudio en el río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza.



**Figura 3-15:** Propuesta metodológica para el análisis de dinámica fluvial e identificación de zonas susceptibles a inundación a partir de criterios geomorfológicos y sensores remotos.

Esta metodología comienza con la adquisición de información procedente de sensores remotos e información base de vuelos satelitales y el MDT. Es importante destacar que se debe contar con un mínimo de dos imágenes de épocas diferentes. Con la información recopilada se procede al análisis de la zona utilizando la imagen más antigua disponible, la cual puede ser digital o análoga, según la información existente. El propósito de este análisis inicial es establecer un cauce inicial como punto de inicio para la comparación de los resultados. Seguidamente, se realiza la clasificación de coberturas, preferiblemente supervisada, sobre las imágenes satelitales con fecha posterior a la inicial, teniendo el cuidado de generar suficientes zonas de entrenamiento para garantizar la mejor representación de las superficies, destacándose la superficie de agua. Se deben revisar los resultados obtenidos y no avanzar hasta estar totalmente satisfechos con los mismos.

Una vez se consideran adecuados los resultados se almacena cada procesamiento en formato vector o formato raster y se destacan las zonas de dinámica fluvial. Por otra parte, se propone utilizar el MDT (Modelo Digital de Terreno) procesado con la herramienta HEC-GeoDozer, la cual permite analizar pertinencia o coherencia en los valores del MDT, detectar las celdas con valores nulos y mejorarlos a partir de valores promedio de celdas aledañas o valores establecidos por el usuario (llenado de sumideros). La herramienta HEC-GeoDozer, desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (US ARMY, 2009), es gratuita y funciona sobre ArcGis 9.3 de ESRI. Seguidamente, se propone aplicar el modelo FLOODDEM (UNAL MED, 2014), el cual permite la generación de zonas de inundación a partir de parámetros geomorfológicos obtenidos del Modelo Digital de Terreno (MDT). El modelo FLOODDEM fue facilitado amablemente por sus desarrolladores, para ser implementado en esta investigación, ya que por el momento tiene fines estrictamente académicos.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos, se valida a partir del conocimiento previo estos resultados y se superponen los mismos en aras de establecer entre otros productos: Zona inundable preliminar con criterios geomorfológicos, zonas de alta dinámica y la envolvente máxima de los terrenos que han pertenecido al río, es decir, el cauce histórico.

### 3.6.3 Metodología para delimitación de zonas inundables.

La delimitación de las zonas susceptibles a inundación resulta de la combinación del análisis de los resultados obtenidos con la modelación matemática en hidráulica, lograda con los mejores parámetros de rugosidad “ $n$ ” de Manning (calibración), y la zona inundable obtenida de la aplicación de criterios de dinámica fluvial y geomorfología, como se aprecia en la Figura 3-16. Metodologías similares han sido implementadas por (Sarache, 2015) en la delimitación de rondas hídricas.



**Figura 3-16:** Propuesta metodológica para establecer zonas susceptibles a inundación a partir de modelación matemática y criterios geomorfológicos.

## 3.7 Comentarios finales sobre el Capítulo 3

En este capítulo se ha presentado una discusión de los diferentes modelos hidráulicos e hidrológicos considerados potencialmente aplicables en la zona de estudio, destacando

que la aplicabilidad de uno u otro depende de la cantidad y calidad de la información existente en la zona de estudio. En el caso particular del componente hidrológico usualmente la rigurosa implementación de los modelos lluvia – escorrentía se ve profundamente limitada por la imposibilidad común de implementar procesos de calibración y validación, para lo cual se requiere información coincidente de precipitación en las cuencas y caudales a la salida de las mismas, lo cual no es característico en zonas con información limitada (como la de estudio). Sin embargo, aún con los limitantes detallados ampliamente a lo largo de este Capítulo, se decidió implementar una modelación lluvia escorrentía en la zona de estudio, con el objetivo de establecer la respuesta hidrológica a resolución diaria que podría esperarse en la zona en un año Normal, año Niño y año Niña. Lo anterior, en aras de no ignorar *a priori* estos aportes en la posterior modelación hidráulica. Para el análisis hidrológico, se propone además la implementación del Balance Hidrológico de Largo Plazo BHLP con el cual se genera información de zonas con déficit o superávit de agua en el Bajo Magdalena.

Cabe destacar que los aportes de caudales esperados para las áreas aferentes en la zona de estudio, se estiman (*a priori*) considerablemente mucho menores a los que transporta el río Magdalena desde Calamar, una vez se deriva el caudal para el Canal del Dique, por lo que la hidrología de las cuencas aferentes no impactaría dramáticamente los resultados de modelaciones hidráulicas para zonas de amenaza por inundación en el área de estudio aferente al río Magdalena en su parte baja. Sin embargo, estos caudales aportantes si permiten realizar una modelación más completa de los escenarios de intercambio hídrico río-ciénaga o viceversa, bajo diferentes condiciones de variabilidad climática (caso ENOS).

Se establece además en este Capítulo la importancia de los Sensores Remotos en el estudio de hidrosistemas y se analiza la diferencia terminológica sobre diferentes formas de representación del terreno a partir de productos derivados de estos, consensuando que nos referiremos a MDT (Modelos Digitales de Terreno) y que de las representaciones globales existentes es el ASTERGDEM (30 x 30m) la base a ser utilizada, teniendo en cuenta que, al comparar algunos valores contra el STRM (90 x 90 m), no se evidenciaron diferencias notables, ya que la cobertura vegetal en la zona no es marcada al igual que la presencia de árboles grandes y nubosidad.

Por otra parte, la dificultad de implementar rigurosamente la modelación matemática en hidráulica, en zonas con información limitada, utilizando para ello información secundaria, es abordado en este Capítulo. Se planteó una metodología para la modelación hidráulica de hidrosistemas complejos con información escasa utilizando en la calibración productos derivados de sensores remotos (imágenes de satélite) y evaluando su desempeño numéricamente a partir del factor “ $F$ ”, destacando que, en comparación con otras metodologías existentes en la literatura especializada sobre inundaciones, la aquí planteada propone sinergias entre modelos matemáticos en una dimensión ( $1D$ ) cuyos resultados alimentan y acotan la modelación en dos dimensiones ( $2D$ ), buscando obtener una mejor representación de los parámetros sensibles de la modelación hidráulica de cauces naturales, que en la mayoría de los casos resulta ser el coeficiente de rugosidad “ $n$ ” de Manning. Con un modelo calibrado e integrado con el resultado de la modelación hidrológica, se ha realizado el estudio de intercambios hídricos para año normal, año Niño y año Niña, debido a la sensibilidad de la zona ante la ocurrencia del fenómeno macroclimático ENOS, detallada en el Capítulo 2. Se ha establecido también, la metodología para la delimitación de zonas inundables utilizando como parámetros los resultados de la modelación matemática en conjunto con los criterios geomorfológicos y la dinámica fluvial, mediante los cuales finalmente se pretende abordar la problemática existente en lo que respecta a la delimitación de zonas susceptibles de inundación en el área de estudio.

Los procedimientos metodológicos propuestos y descritos en detalle en este capítulo son implementados en el Capítulo 4 para dar respuesta a la problemática planteada en la investigación, intercambios hídricos río Magdalena – ciénagas e identificación de zonas susceptibles a inundación.

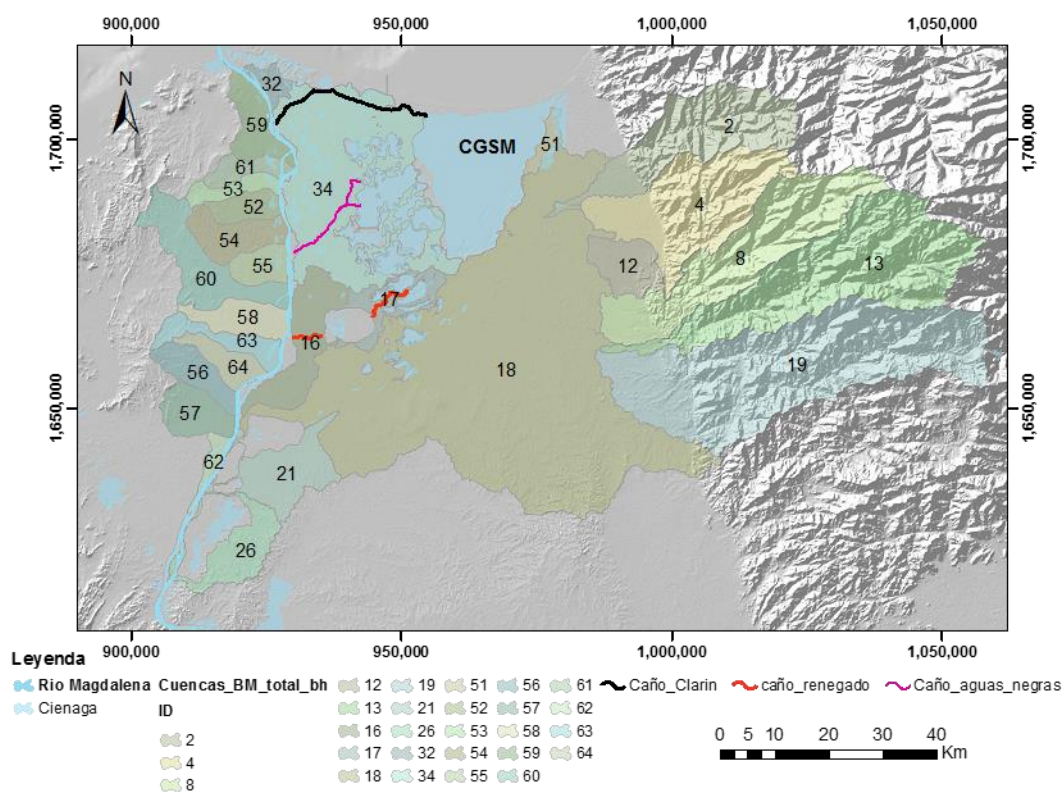
## **4. Hidrología, hidráulica y dinámica fluvial en la zona de estudio**

En los Capítulos precedentes se han descrito las particularidades físicas de la zona de estudio y la problemática que esta enfrenta, en cuanto al desconocimiento de los intercambios hídricos entre el río Magdalena y las ciénagas circundantes, además del riesgo por inundación sobre poblaciones ribereñas, lo cual la hace notablemente vulnerable a la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos como el ENSO (El Niño o La Niña), evidente por ejemplo entre los años 2010 – 2011 (Capítulo 2)). En este Capítulo se describe la implementación de la propuesta metodológica detallada en el Capítulo 3 de este documento para investigar intercambios hídricos e inundabilidad en zonas amplias con información limitada o escasa.

Este Capítulo se inicia con la descripción de los resultados del estudio hidrológico para la zona de estudio, delimitación de cuencas y estimación de la escurrimiento superficial con agregación anual, a partir de la aplicación del BHP y la estimación de la escurrimiento con agregación diaria implementando la herramienta computacional *HEC-HMS v4.1* (modelación continua o extendida). Seguidamente, se presenta la modelación hidráulica y en ella se implementa la calibración del modelo hidráulico a partir de los resultados de la mancha de inundación extraída de la interpretación de una imagen satelital. Esta calibración se efectúa utilizando como referencia una zona reducida dentro del área de estudio (20 km), la cual presenta desborde lateral e interacción río Magdalena – ciénagas. Posteriormente se aplica la modelación a la zona amplia de estudio, utilizando el coeficiente “*n*” de Manning que permitió la mejor aproximación a la mancha de inundación de referencia. Continúa este Capítulo con el detalle de los resultados del análisis de la dinámica fluvial del río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza (Barranquilla), y la dinámica de los espejos de agua de las ciénagas, información que posteriormente es utilizada en la estimación de zonas susceptibles a inundación.

## 4.1 Hidrología de la zona de estudio

El análisis hidrológico en la zona de estudio requirió inicialmente la delimitación de las microcuencas aferentes a las ciénagas. Esta delimitación se realizó a partir del MDT de la zona de estudio, el cual fue definido como ASTERG-DEM con integración de la información topobatemétrica recibida, según fue descrito en capítulos anteriores, para lo cual se utilizó la extensión HEC-GeoHMS instalada en ArcGIS v10.1. El resultado fue la delimitación de 27 microcuencas, las cuales se presentan en la Figura 4-1, mientras que los parámetros morfométricos principales se presentan en la Tabla 4-1. La nomenclatura de las cuencas obedece al hidroDEM elaborado por la herramienta computacional implementada.



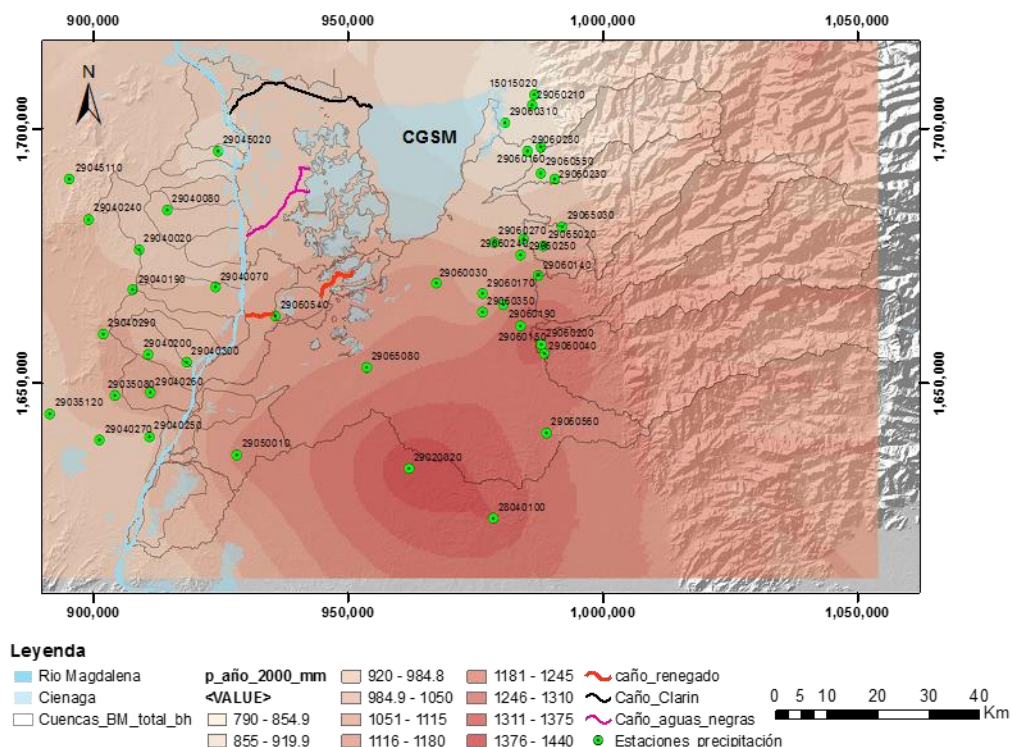
**Figura 4-1:** Microcuencas en el área de estudio (Bajo Magdalena).



**Tabla 4-1:** Principales parámetros morfométricos en las microcuencas del área de estudio (Bajo Magdalena).

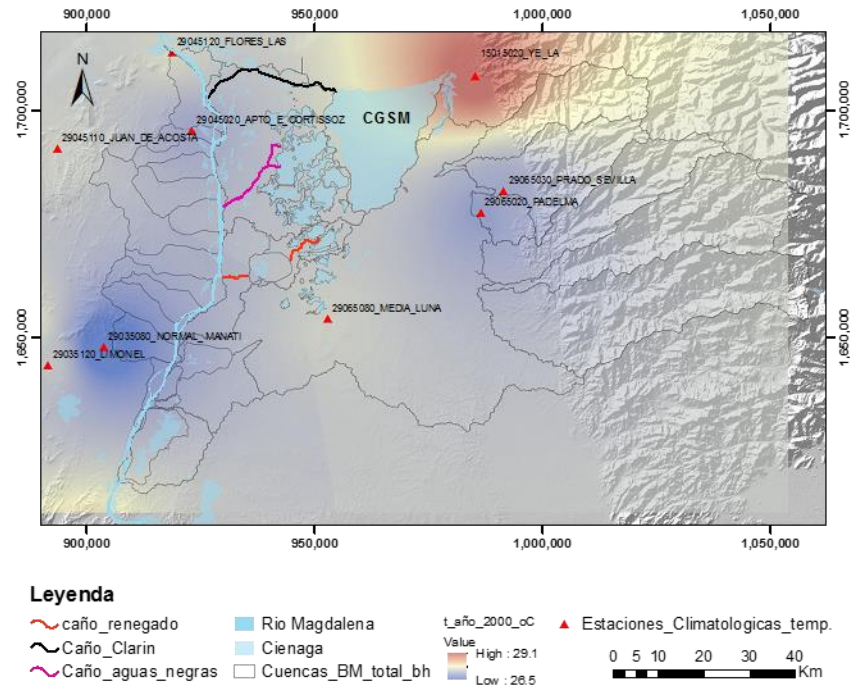
ID	COUNT	Area (km <sup>2</sup> )	Elev. Min. (mnsnm)	Elev. Max. (mnsnm)	Elevación promedio (mnsnm)	Longitud cauce ppal (km)	Pendiente (m/m)	CN (SCS)	Uso de tierra (SCS)	Tc (h) Tiempo de concentración	Tc (min) - Tiempo de concentración	Estación PM	Código
2	15737796	383.4	1	4262	1360.79	35.2	0.121	55	Bosques cubierta buena	13.37	802.33	El Enano	29060160
4	19068048	476.7	1	4463	1175.41	47.89	0.093	55	Bosques cubierta buena	19.50	1169.86	Prado Sevilla	29065080
8	21291840	532.3	24	5580	1800.01	65.61	0.085	55	Bosques cubierta buena	26.28	1576.78	Carmen_El	29060140
12	4501548	112.5	4	413	47.33	9.53	0.043	55	Bosques cubierta buena	7.89	473.21	Padélna	29065020
13	30085632	752.1	32	5673	2858.15	79.98	0.071	55	Bosques cubierta buena	33.74	2024.37	San Sebastian	29060090
16	7756192	193.9	1	54	5.48	18.03	0.003	58	Bosques cubierta buena	46.53	2791.89	San Rafael	29060540
17	3576161	89.39	1	60	6.26	3.3	0.018	58	Vega de ríos	4.85	290.99	San Rafael	29060540
18	93382357	2336	1	542	37.74	57.4	0.009	58	Vega de ríos	65.63	3937.57	Dorla María	29060560
19	42918490	1073	32	3917	1262.22	82.19	0.047	55	Bosques cubierta buena	42.12	2527.32	San Sebastian	29060090
21	7405305	185.2	1	74	21.02	14.28	0.005	58	Vega de ríos	29.28	1756.82	Tiogollo	29050010
26	5904584	147.7	1	124	33.80	9.12	0.013	58	Vega de ríos	12.59	755.58	Tiogollo	29050010
32	1667529	41.67	1	53	5.55	2.34	0.022	58	Vega de ríos	3.30	198.25	Apto_Ernesto_C	29045020
34	27220614	680.8	1	113	4.17	19.8	0.006	58	Vega de ríos	36.15	2169.19	San Rafael	29060540
51	1397308	34.91	0	65	6.06	1.7	0.038	58	Vega de ríos	1.95	117.05	Sevillano	29060310
52	2543586	63.59	1	131	39.20	13.08	0.010	79	Pastizales pobres	11.09	665.20	Polonuevo	29040080
53	2129709	53.24	1	152	61.24	16.12	0.009	79	Pastizales pobres	13.50	809.87	Apto_Ernesto_C	29045020
54	4612982	115.3	1	139	50.86	17.36	0.008	79	Pastizales pobres	15.55	932.84	Polonuevo	29040080
55	2881298	67.03	1	61	19.44	9.26	0.006	79	Pastizales pobres	10.42	624.96	Montebello	29040020
56	3626846	90.67	1	201	61.31	18.8	0.011	79	Pastizales pobres	14.32	859.45	Lena	29040200
57	4146054	103.7	1	137	21.23	13.89	0.010	79	Pastizales pobres	11.72	718.19	Candelaria	29040260
58	3979857	99.5	1	124	33.22	19.54	0.006	79	Pastizales pobres	19.21	1152.34	Montebello	29040020
59	4287416	108.1	1	144	30.58	7.74	0.018	79	Pastizales pobres	5.34	320.65	Apto_Ernesto_C	29045020
60	8286894	207.2	1	311	83.81	36.67	0.008	79	Pastizales pobres	27.42	1645.33	Montebello	29040020
61	2184575	55.35	1	130	46.71	12.91	0.010	79	Pastizales pobres	10.94	656.51	Apto_Ernesto_C	29045020
62	1239610	31.36	1	27	5.06	6	0.004	58	Vega de ríos	15.89	953.57	Campo de la Cruz	29040250
63	3402812	85.07	1	205	50.26	23.78	0.009	79	Pastizales pobres	19.25	1155.02	Montebello	29040020
64	2894235	72.36	1	132	32.86	17.26	0.008	79	Pastizales pobres	15.84	950.27	Montebello	29040020

La Figura 4-2 muestra el resultado de la interpolación de la precipitación anual realizada en la zona de estudio para el año 2000, se aprecia en colores cálidos la mayor concentración de precipitación hacia el sur de la zona de estudio con valores cercanos a los 1440 mm/año, mientras que, hacia la zona norte se registran valores cercanos a 790 mm/año, los mínimos valores. Nótese además la información limitada en zonas altas de las cuencas provenientes de la SNSM, margen oriental de la zona de estudio.

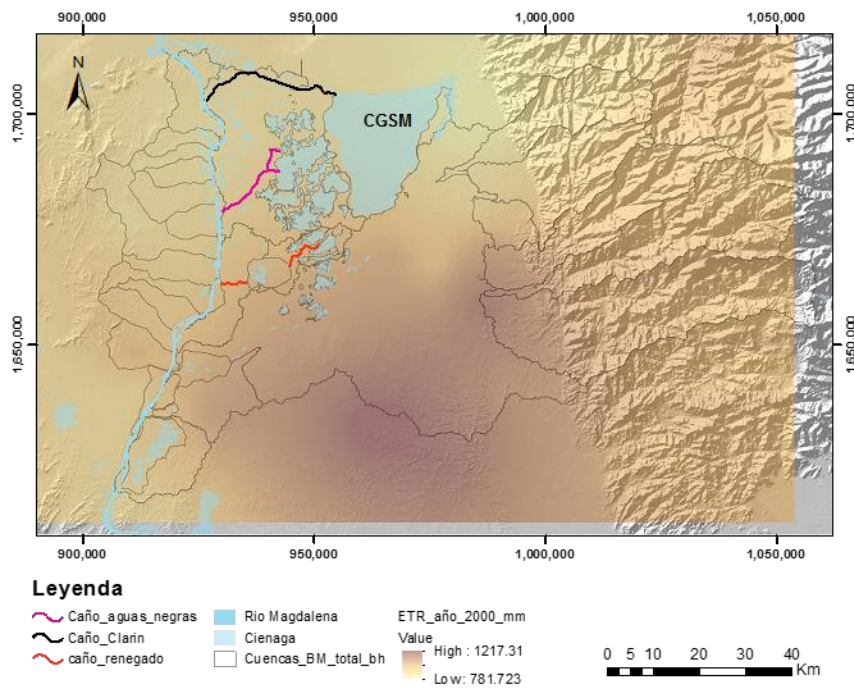


**Figura 4-2:** Interpolación de la precipitación acumulada anual en el área de estudio para el año 2000.

La interpolación de la temperatura presentada en la Figura 4-3, detalla una temperatura mínima de 26°C y máxima de 28°C para la zona de estudio, solo 2°C de variación. Mientras que en los resultados de la evapotranspiración real calculada por el método de Turc para el año 2000 y reportada en la Figura 4-4, se aprecian valores entre 1200 mm/año y 780 mm/año, hacia el costado Sur y costado Norte del área de estudio, respectivamente. Además, información limitada en zonas altas de las cuencas provenientes de la SNSM, costado oriental de la zona de estudio.

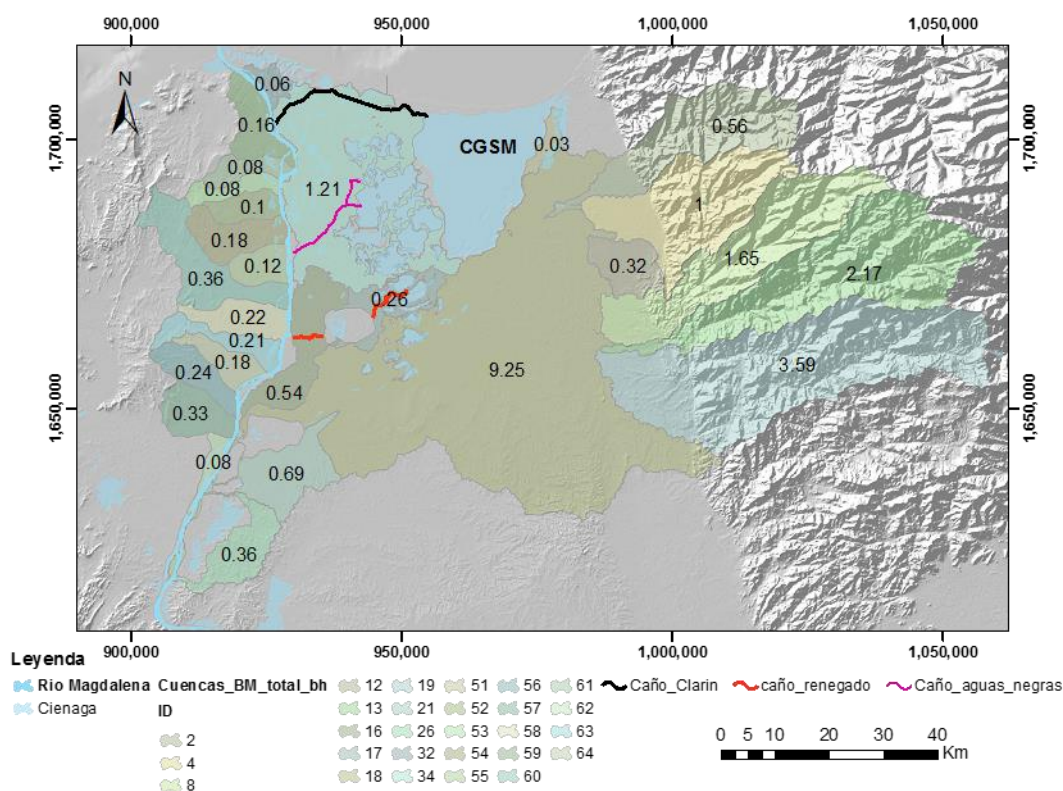


**Figura 4-3:** Interpolación de la temperatura promedio anual en la zona de estudio para el año 2000.



**Figura 4-4:** Resultado de la Evapotranspiración real media anual en la zona de estudio para el año 2000.

Los resultados de caudal producto de la aplicación del BHLP se presentan en la Figura 4-5. Nótese que los mayores valores de caudal medio anual corresponden a las microcuencas del costado oriental, con un valor total acumulado cercano a los 22 m<sup>3</sup>/s (año 2000). Los caudales medios de escorrentía en el costado occidental son mucho menores y suman cerca de 3.0 m<sup>3</sup>/s (año 2000), aproximadamente un 14% del caudal medio total del costado oriental. Cabe recordar que la resolución espacial del álgebra de mapas corresponde a un tamaño de celda de 30 x 30m (ASTER G DEM).



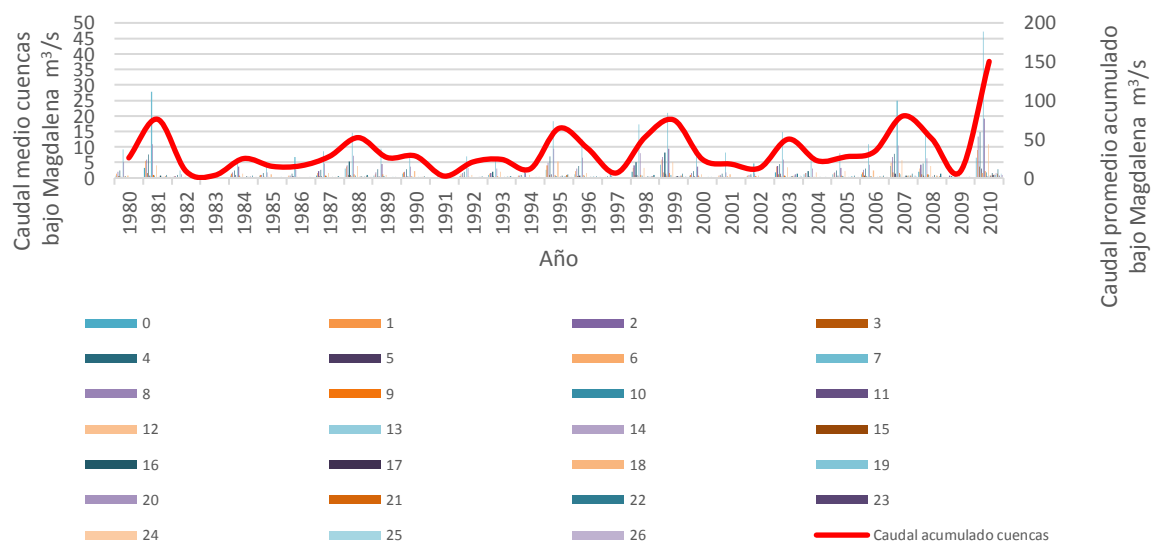
**Figura 4-5:** Resultado de la implementación del Balance Hídrico de Largo Plazo (BHLP) para el año 2000. Caudal en m<sup>3</sup>/s.

En total, el caudal medio por escorrentía superficial esperado en el tramo del área de estudio es de aproximadamente 25 m<sup>3</sup>/s (año 2000). Al comparar estos valores con los caudales de entrada al hidrosistema a través del río Magdalena después de la derivación del Canal del Dique, se aprecia que el caudal promedio para el río Magdalena en el año



2000 fue de 9427 m<sup>3</sup>/s, siendo la esorrentía de la zona tan solo un 0.30% del caudal medio del río Magdalena para este año, aproximadamente.

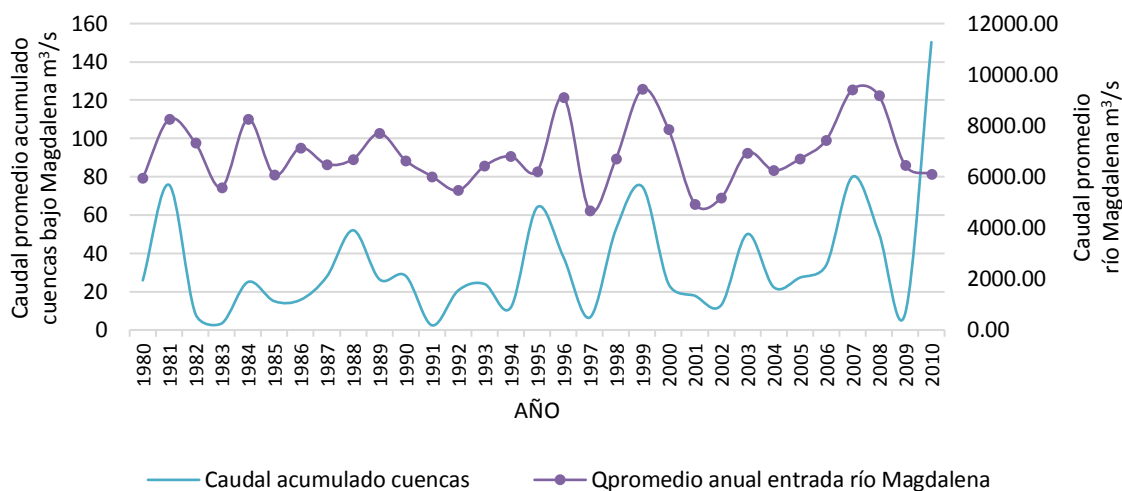
A pesar de no poder ser totalmente concluyentes con respecto a la relación de caudales de esorrentía *versus* caudales en el río Magdalena, por factores asociados con la calidad y cantidad de información disponible, la cual limita una adecuada calibración de parámetros y validación de los resultados, estos análisis hidrológicos a través del BHLP son considerados importantes ya que permiten establecer el orden de magnitud de los caudales promedio anuales esperados como respuesta de estas microcuencas de la zona de estudio. La Figura 4-6, resume los valores de caudal medio en cada una de las 27 microcuencas establecidas para la zona de estudio y el caudal acumulado de la zona en el período 1980 – 2010. Nótese un valor pico de caudal para el año 2010 y un caudal mínimo para el año 1991; años caracterizados como Niña y Niño, respectivamente.



**Figura 4-6:** Caudal medio anual en cada microcuenca con BHLP y caudal acumulado período 1980 – 2010.

En la Figura 4-7, se compara el caudal promedio anual de esorrentía superficial acumulado en todas las cuencas aferentes al Bajo Magdalena (área de estudio), con el caudal promedio anual en el río Magdalena una vez se deriva el caudal del Canal del Dique (diferencia entre los caudales reportados en la estación Calamar y la estación Incora K7). Los caudales medios anuales en el río Magdalena superan considerablemente los

caudales esperados en las microcuencas aferentes al río Magdalena en la zona de estudio, siendo este último un valor muy inferior al 1% en todos los años reportados entre el 1980 – 2010. La comparación de los caudales medios en la zona, sugiere una mayor preponderancia de los caudales provenientes de la cuenca media del río Magdalena, aún después de derivado el caudal del Canal del Dique, en comparación con los propios caudales de escorrentía superficial, sin desconocer que estos últimos caudales no son nada despreciables y en su mayoría alimentan la amplia cantidad de cuerpos cenagosos existentes en la zona.



**Figura 4-7:** Caudal promedio anual en el Bajo Magdalena estimado con BHLF y caudal promedio anual río Magdalena obtenido de información hidrométrica período 1980 – 2010.

Una vez conocidas las magnitudes promedio de los caudales en la zona de estudio y efectuada su comparación con los caudales en el río Magdalena, se ha implementado la modelación matemática en hidrología con el propósito de estimar el posible aporte por escorrentía superficial hacia las ciénagas, en año Normal, año Niño y año Niña, para una resolución diaria. Lo anterior, considerando la influencia de los fenómenos macroclimáticos en la zona, descritos en el Capítulo 2 de este documento.

La herramienta computacional HEC-HMS v4.1, en tiempo extendido o modelación continua, permite estimar los aportes diarios de los caudales de escorrentía superficial, una vez se ha realizado la estimación de pérdidas por infiltración, evapotranspiración, etc.

Este modelo se considera apropiado para la modelación matemática de intercambios hídricos entre el río Magdalena y las ciénagas del sector, dada la información existente (limitada).

Inicialmente se implementó la herramienta computacional HEC-GeoHMS como apoyo a la estimación de los parámetros morfométricos de las cuencas, incluyendo: Área, pendiente, Longitud más larga de la cuenca, etc. Además, se establecieron los parámetros requeridos en cada cuenca para lograr la adecuada implementación del modelo hidrológico, como es el tiempo de concentración y el tiempo de retardo (ver Tabla 4-1). Con el apoyo de mapas de coberturas de suelo y los mapas de suelo, se seleccionó el tipo de cobertura predominante en cada cuenca para luego utilizar la metodología propuesta por el Soil Conservation Service (SCS), ampliamente discutida en la bibliografía científica y que resulta aplicable al ponderar los distintos métodos de estimación de pérdidas por infiltración Vs. la información obtenida de la zona. Esta metodología, propuesta en 1972 permite el cálculo de abstracciones de la precipitación de una tormenta. Lo primero es establecer el CN (número de curva por sus siglas en inglés), después se evalúa el tiempo de concentración aplicando la Ecuación 25 propuesta por el SCS y finalmente se evalúa el tiempo de retardo, o tiempo entre el centroide del hietograma de precipitación efectiva y el pico del hidrograma de respuesta de la cuenca, el cual se establece como el 60% del tiempo de concentración, según esta metodología (ver Ecuación 26), (Warren Viessman and Gary L., 2008).

$$t_c = \frac{1.67L^{0.8}[(1000/CN)-9]^{0.7}}{1900S^{0.5}} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$t_r = 0.60t_c \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde  $t_c$  es el tiempo de concentración en horas,  $L$  es la longitud del cauce principal en pies,  $CN$  es el Número de Curva seleccionado,  $S$  es la pendiente media de la cuenca en %, y  $t_r$  es el tiempo de retardo en unidades consistentes.

Los resultados para cada una de las microcuencas se presentan en la Tabla 4-1. En esta misma tabla se presenta también la estación de precipitación asociada a cada microcuenca, la cual, se determinó a partir de polígonos de *Thiessen*, utilizando las

estaciones con mejor cantidad de información para el período comprendido entre 2008 y 2011, período durante el cual y de acuerdo con reportes del ONI (ver Tabla 4-2), el país pasó de una condición normal en el trimestre AMJ (Abril, Mayo, Junio) del 2009, a una fase Niño que se extendió hasta el trimestre MAM (Marzo, Abril, Mayo), del 2010, luego siguió una fase Neutra hasta el trimestre MJJ, y una fase Niña desde el trimestre JJA (Junio, Julio, Agosto), del 2010, que se extendió hasta (Marzo, Abril, Mayo), del 2011. Finalmente, en el trimestre ASO (agosto, septiembre, octubre), de 2011, nuevamente se presentó una fase Niña, que se extendió hasta comienzos del año 2012. Estas últimas fechas corresponden a la fase la Niña que ocasionó una gran catástrofe en la zona, incluida la rotura del Canal del Dique en 2011, popularmente conocidas como la “ola invernal” 2010-2011. En la Tabla 4-2 se aprecia el promedio de temperatura en el Océano Pacífico.

**Tabla 4-2:** Reporte trimestral del comportamiento de fenómeno ENOS en el período 1981 – 2011, identificando fases Niño (color rojo), Niña (color azul) y Normal (color gris). Fuente: NOAA.

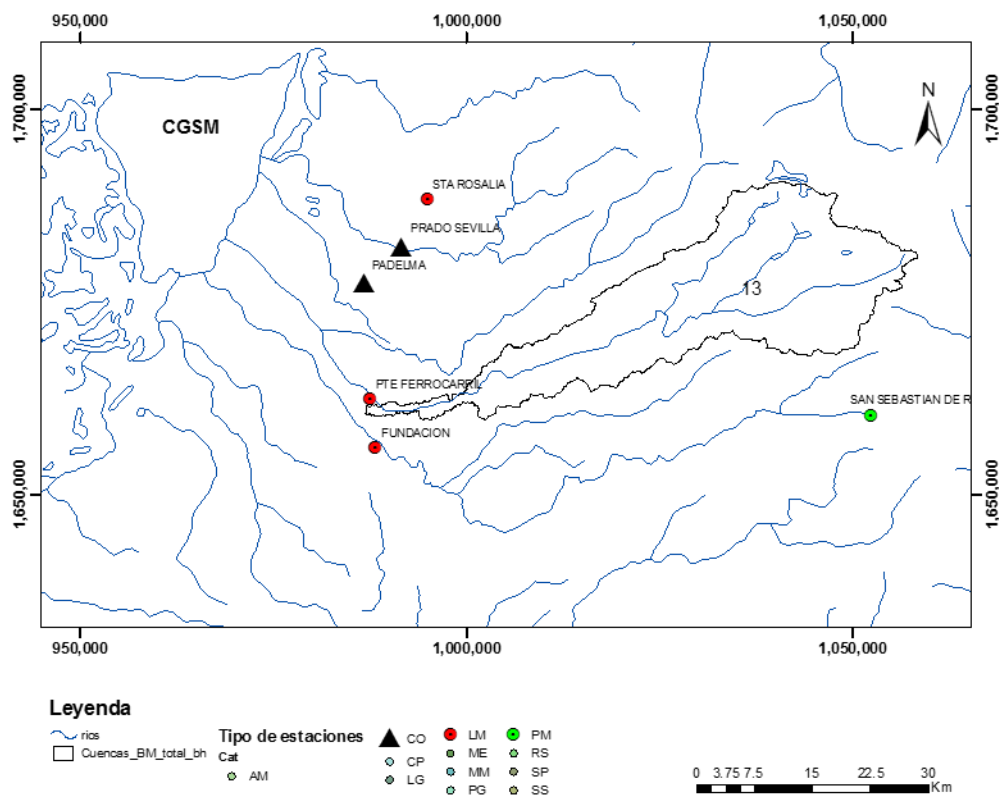
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1981	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1
1982	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	1.0	1.5	1.9	2.1	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.2	0.9	0.6	0.2	-0.2	-0.5	-0.8	-0.9	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1.0	-0.9	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4
1986	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0	1.2	1.4	1.6	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.2	-0.8	-1.2	-1.3	-1.2	-1.3	-1.6	-1.9	-1.9
1989	-1.7	-1.5	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	1.2	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.2	0.0
1993	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	1.0	1.2
1995	1.0	0.8	0.6	0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.2	0.7	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.4	2.3
1998	2.2	1.8	1.4	0.9	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5
1999	-1.5	-1.3	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.5	-1.2	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
2002	-0.2	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3
2003	1.1	0.8	0.4	0.0	-0.2	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
2004	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8
2006	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.0
2007	0.7	0.3	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.8	-1.1	-1.2	-1.4
2008	-1.5	-1.5	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.5	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6
2010	1.6	1.3	1.0	0.6	0.1	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.6	-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0	-1.0



Utilizando el método **Deficit and Constant** para estimar pérdidas en la modelación continua, se implementa ahora la modelación en HEC-HMS v4.1. Junto a este método de pérdidas descrito en el Capítulo 2, se implementó el hidrograma unitario del SCS como método para la transformación de la precipitación en escorrentía superficial de salida en las cuencas. En la definición del modelo meteorológico se seleccionó el método FAO56 para la estimación de la radiación de onda corta (*Shortwave*) y de onda larga (*Longwave*), requeridas por el método de cálculo seleccionado para la evapotranspiración el cual fue *Penman-Monteith*. Además, fue incluida en el modelo la información de velocidad del viento, humedad relativa, horas de sol y temperatura, requeridas por el éste. Esta última información se obtuvo a partir de las estaciones climatológicas: Apto. Ernesto Cortissoz (2904020) para la zona norte, Media Luna (29065080) para la zona central, Normal Manatí (29035080) para la zona suroccidental, Padelma (29065020) para la zona sur-oriental y Prado-Sevilla (29065030) para la zona nororiental, principalmente. El método **Deficit and Constant**, requiere la definición de los siguientes parámetros: Déficit Inicial (*Initial Deficit, mm*), Máximo Déficit (*Maximum Deficit, mm*) y tasa constante (*Constant rate, mm/h*), mientras que los procesos en la cobertura vegetal (*Canopy*) y en la superficie (*Surface*), requiere definir en ambos el almacenamiento inicial (*Initial Storage, %*) y el máximo almacenamiento (*Max Storage, mm*). Parámetros que deberían ser calibrados para cada cuenca. Sin embargo, teniendo en cuenta que solo para una microcuenca (*ID 13*, Figura 4-1) fue posible disponer de información coincidente de precipitación y caudales a la salida de la microcuenca, se decide realizar el ejercicio de calibración en esta microcuenca y generalizar en toda la zona los parámetros allí encontrados. En esta microcuenca, correspondiente a la cuenca del río Aracataca proveniente de la SNSM se utilizaron los valores de precipitación registrados por la estación San Sebastián (29060090) ubicada en la zona alta (SNSM) y los valores de caudal reportados en la estación Puente Ferrocarril (26067130) ubicada en la zona baja al cierre de la misma. En la Figura 4-8 se presenta la microcuenca, destacando los datos de entrada antes mencionados, mientras que los resultados son resumidos en tres aspectos principales:

- a. Función objetivo: Teniendo en cuenta que la herramienta computacional implementada cuenta con gran variedad de opciones en este respecto, se fija como función objetivo aquella que permita representar mejor el volumen de escorrentía en la salida de la cuenca, por tratarse de una modelación extendida. Los mejores resultados fueron obtenidos con *Percent Error Volume* como función objetivo.

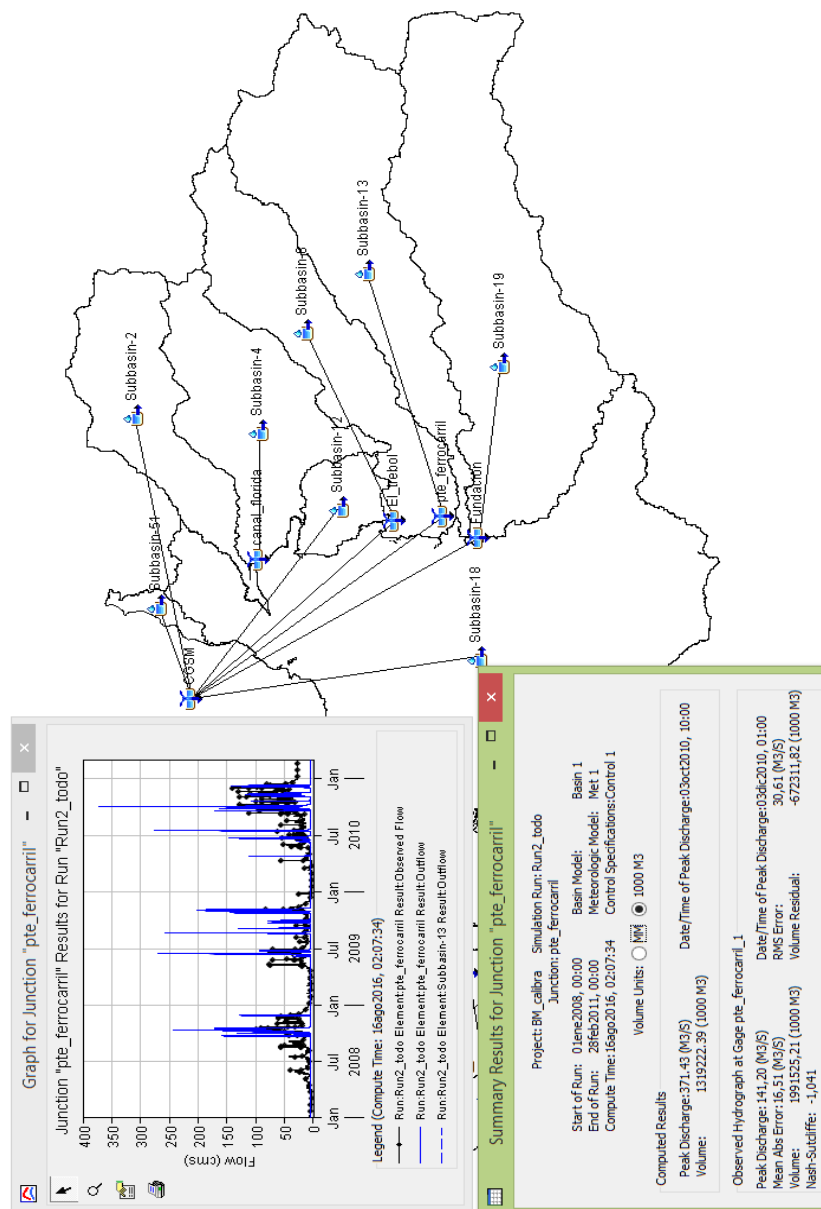
- b. Los parámetros calibrados fueron los 7 citados anteriormente, de los cuales se encontró mayor sensibilidad en los valores máximos de almacenamiento tanto en la cobertura vegetal como en la superficie, además, del ajuste en el *tiempo de retardo*.
- c. La evaluación de parámetros se realizó en el período 2008-2011. Período que incluye fases Niño y Niña en la zona de estudio.



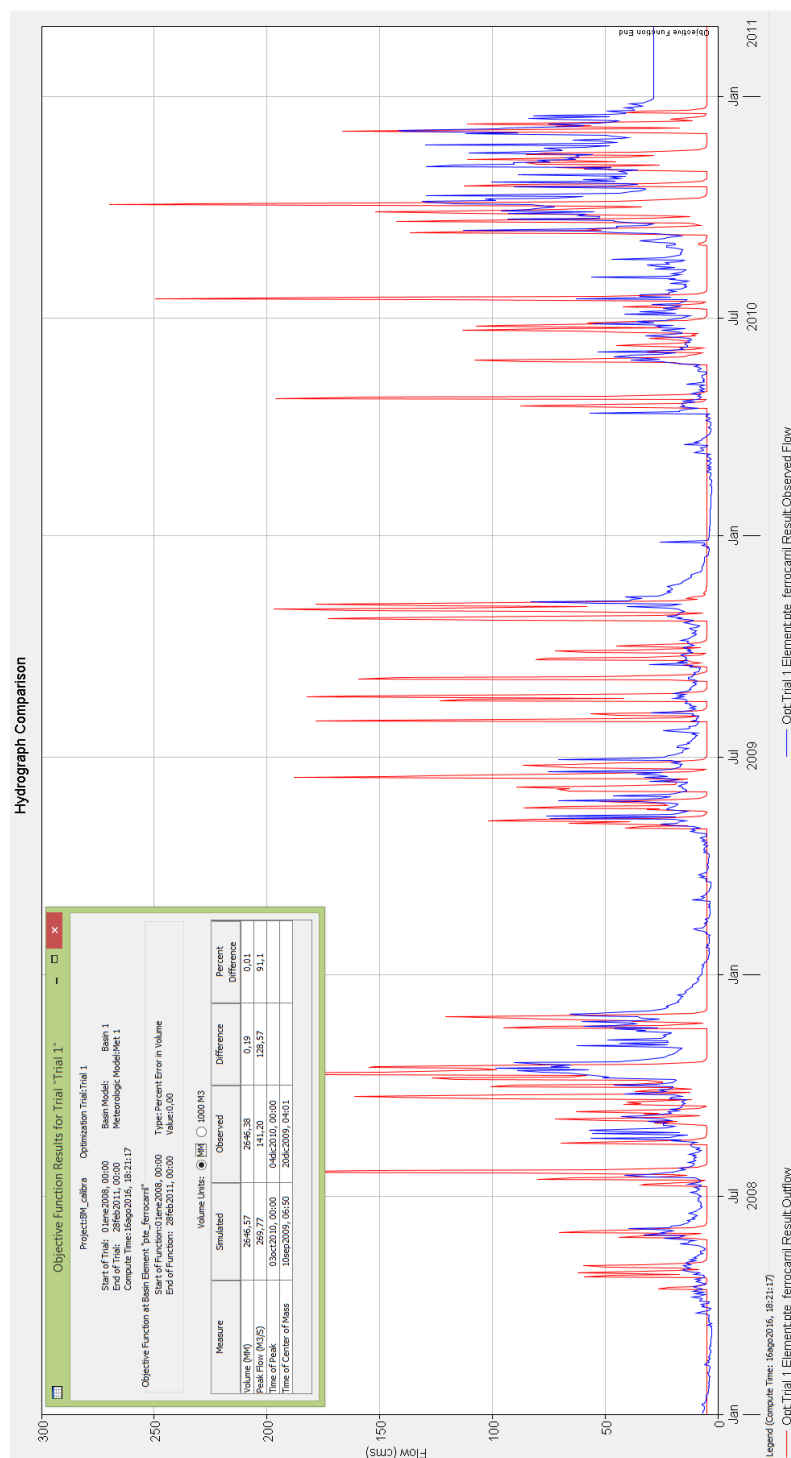
**Figura 4-8:** Microcuenca ID 13 para calibración de parámetros en modelación hidrológica HEC-HMS v 4.1.

En la Figura 4-9 se observa como la primera modelación, con parámetros estimados, no ofrece resultados satisfactorios con respecto a los caudales registrados en la salida de la cuenca, donde el volumen total registrado por la estación ferrocarril fue de 1991 Mm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos en el período 2008-2011), mientras que el volumen de la hidrógrafa procedente de la modelación resulta ser 1,319 Mm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos en el período 2008-2011), con un volumen residual de 672 Mm<sup>3</sup>. Una vez fijada la función

objetivo (*Percent Error Volume*) y seleccionados los 7 parámetros para calibración, se obtienen los resultados de la modelación presentados en la Figura 4-10 y Figura 4-11. Nótese cómo el hidrograma de respuesta de la cuenca representado por el color rojo, intenta representar de forma aceptable la forma del hidrograma de salida (medido) identificado por el color azul y es notable además la coincidencia en el volumen de los hidrogramas de salida (volumen 1991 Mm<sup>3</sup>). Los caudales picos no logra representarlos adecuadamente.



**Figura 4-9:** Resultados modelación hidrológica inicial microcuenca ID 13 en HEC-HMS v4.1.



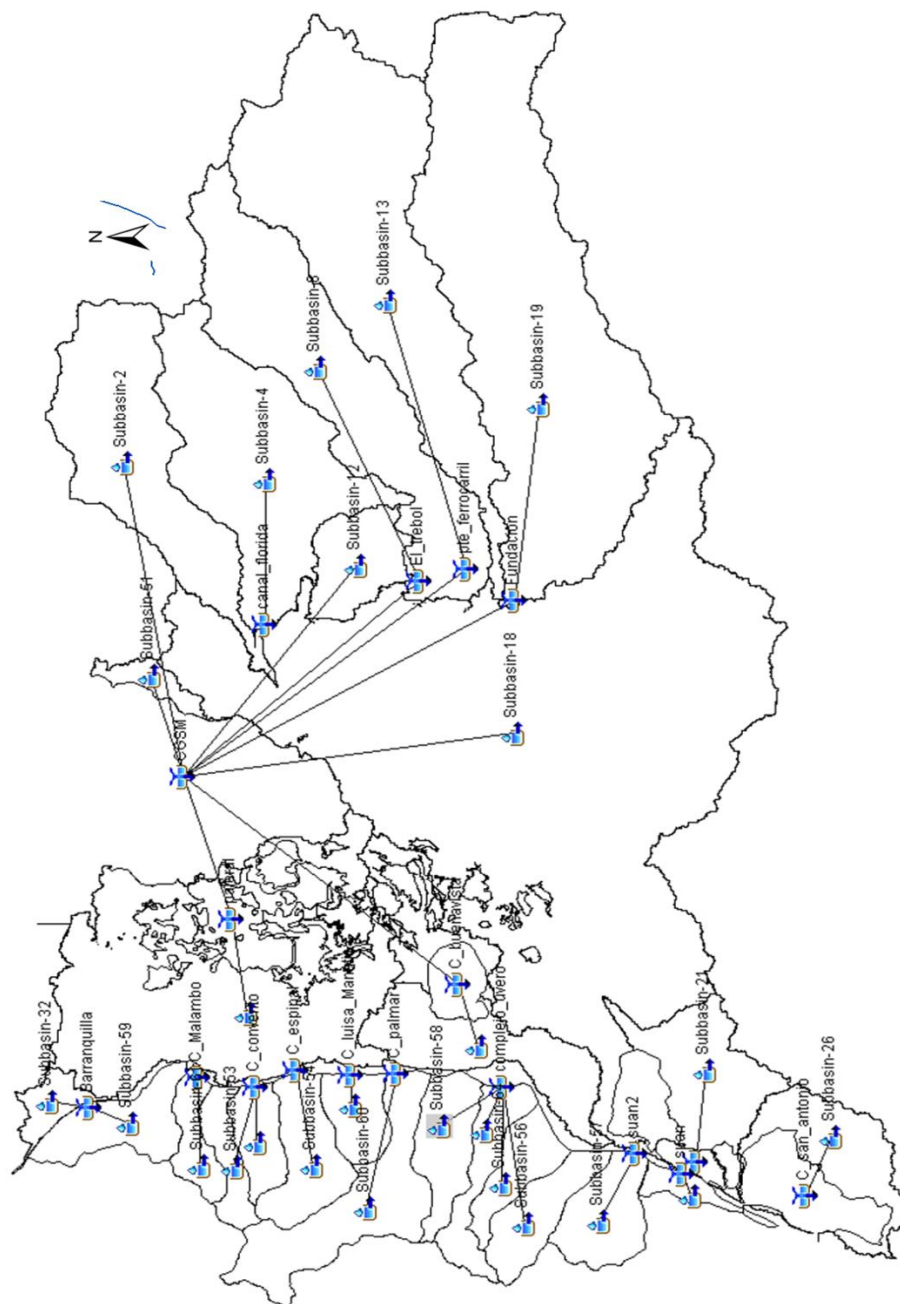
**Figura 4-10:** Resultados modelación hidrológica hidrograma calibrado en la microcuenca ID 13 en HEC-HMS v4.1.

La Figura 4-11 resume los parámetros de calibración, así como los resultados de los parámetros calibrados (optimizados) que han sido utilizados en todas las microcuencas del hidrosistema Bajo Magdalena. Cabe destacar que el parámetro más sensible resulta ser el almacenamiento máximo de la cobertura (*Simple Canopy – Max Storage*). El *lag Time* no es un parámetro de la cuenca.

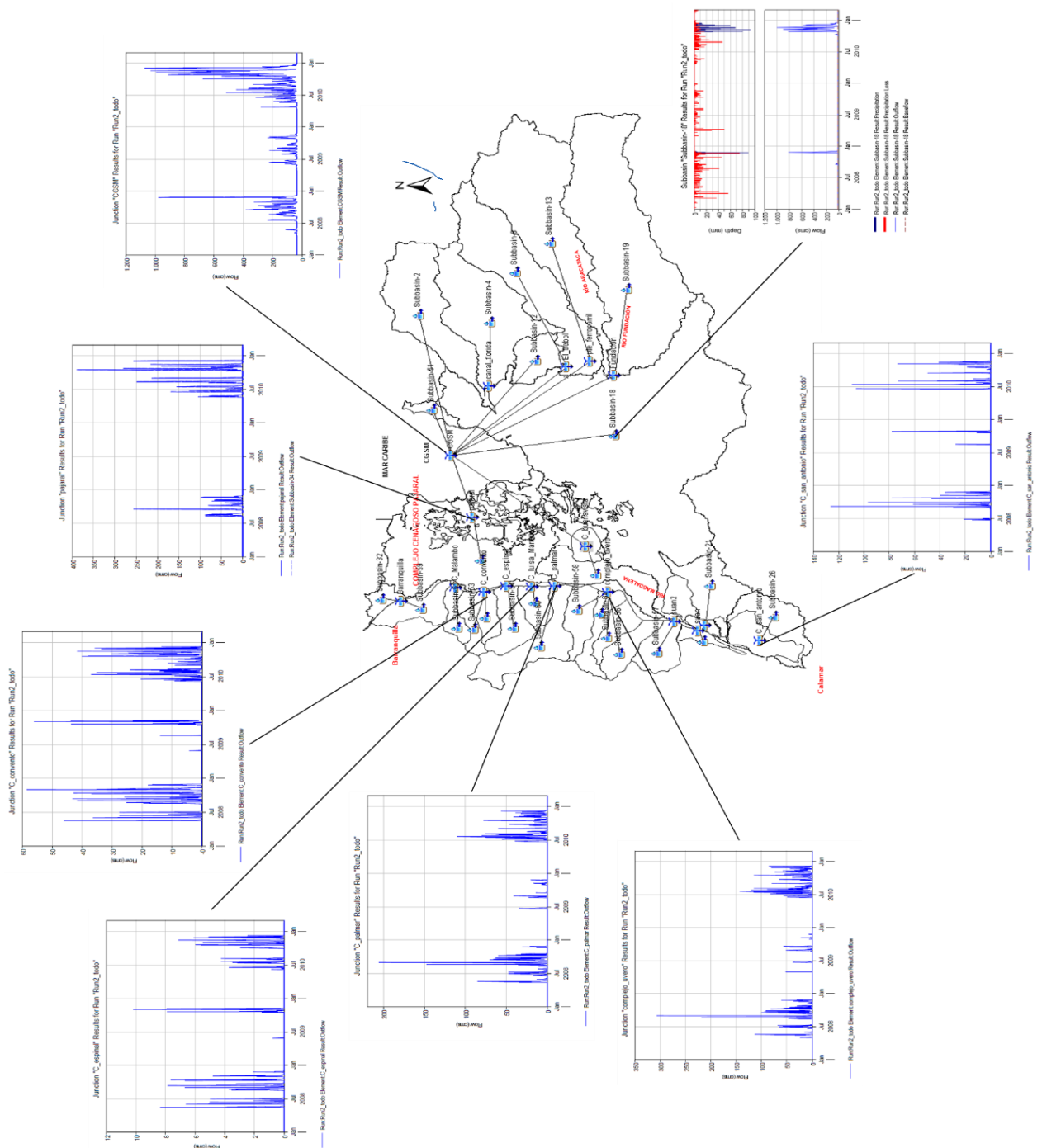
Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
Subbasin-13	Deficit and Constant - Constant Rate	MM/HR	0.1	0.0787568	0
Subbasin-13	Simple Canopy - Max Storage	MM	1	0.93319	-0.31
Subbasin-13	Deficit and Constant - Initial Deficit	MM	1	0.97383	0
Subbasin-13	Deficit and Constant - Maximum Def...	MM	1	1.1052	1
Subbasin-13	Simple Canopy - Initial Storage	%	1	1.0382	0
Subbasin-13	Simple Surface - Initial Storage	%	1	1.0806	0
Subbasin-13	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	1214.62	1214.7	-77.78
Subbasin-13	Simple Surface - Max Storage	MM	100	99.992	-0.02

**Figura 4-11:** Resultados modelación hidrológica calibración de parámetros en la microcuenca *ID 13* en *HEC-HMS*.

Una vez han sido establecidos los mejores parámetros para la representación de abstracciones y cálculo de la ETR en la cuenca piloto o calibración (*ID 13*), y teniendo en cuenta que cuatro de las microcuencas provenientes de la SNSM (*ID 4, 8, 13 y 19*), ver Figura 4-1, cuentan con estaciones de caudales en la salida de las mismas y por tanto tienen datos de caudal, se procede a implementar la modelación matemática a las 23 cuencas restantes del área de estudio, en aras de conocer su respuesta hidrológica en el período 2008 – 2011, utilizando los valores optimizados de las variables calibradas y presentadas en la Figura 4-11. En la Figura 4-12, se presenta el modelo hidrológico general implementado para la zona de estudio, mientras que los resultados de la modelación se sintetizan en la Figura 4-13. Esta última figura detalla los resultados de las microcuencas para el período 2008 – 2011, destacando que estos hidrogramas de respuesta serán incluidos en la modelación hidrodinámica de la zona de estudio como aportes de escorrentía superficial hacia las ciénagas, las cuales se conectan directa o indirectamente (a través de caños) con el río Magdalena, entre Calamar y Bocas de Ceniza.



**Figura 4-12:** Esquema general de modelación hidrológica de la zona de estudio en la herramienta computacional HEC-HMS.



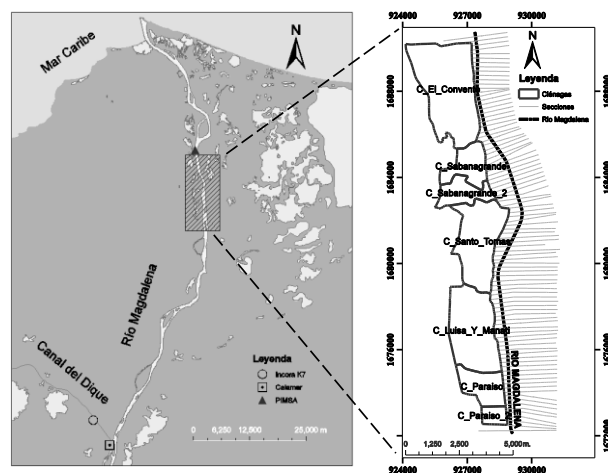
**Figura 4-13:** Resultados en algunas microcuencas de la zona de estudio, de la modelación hidrológica efectuada para el período 2008-2011.

## 4.2 Hidráulica de la zona de estudio.

Para acometer el estudio hidrodinámico de la zona de estudio fue requerido en primera instancia la implementación de la metodología propuesta para la calibración de los parámetros sensibles (" $n$ " Manning y " $C_d$ " coeficiente de descarga), que se resume en la Figura 3-14, y posteriormente se elaboró la modelación general objeto del presente estudio.

### 4.2.1 Sensibilidad y calibración de parámetros hidráulicos

Por la exigencia computacional, el análisis se inicia con la selección de una zona enmarcada dentro del área de estudio, donde sea identificada la conexión río Magdalena – ciénagas. Esta correspondió al sector K40 – K60<sup>13</sup> (20 km), entre los municipios de Malambo y Palmar de Varela (costado occidental departamento del Atlántico), donde se encuentran las ciénagas El Convento, Sabanagrande, Santo Tomás, Luisa, Manatí y ciénaga Paraíso, referidas desde aguas abajo hacia aguas arriba. Ver Figura 4-14.



**Figura 4-14:** Zona para ejercicio de calibración del parámetro sensible " $n$ " de Manning y discretización en el modelo hidráulico 1D.

<sup>13</sup> El K0 corresponde a la desembocadura del río Magdalena en el mar Caribe (Bocas de Ceniza).

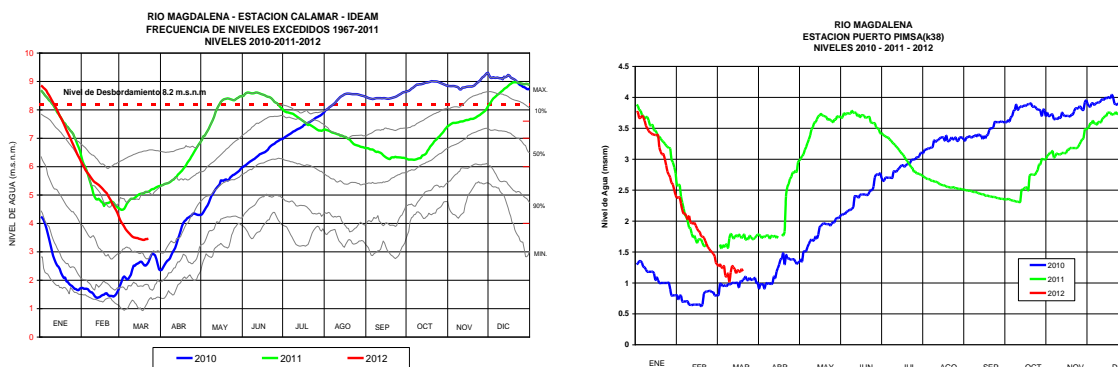


La aplicación de la metodología propuesta en el Capítulo 3, permitió establecer la mejor combinación de los parámetros “ $n$ ” Manning y “ $C_d$ ” coeficiente de descarga, mediante la combinación aleatoria de diferentes valores de Manning en el cauce principal y las bancas izquierda y derecha, mientras que, evaluar la sensibilidad del coeficiente de descarga es debido a que se utilizan vertederos laterales de cresta ancha para representar la conexión del río con las ciénagas circundantes y los diques alrededor, esto en la modelación *1D*. Se implementó en primera instancia el modelo HEC RAS v4.1 para un período de 1 año (2010 – 2011) con el fin de obtener de este la mancha de inundación para un día en el cual fue posible obtener el registro de la inundación por parte de un sensor remoto; la imagen clasificada correspondió al día 28 de diciembre de 2011 del sensor óptico *RapidEye* (resolución 7m x 7m); y se evaluaron los factores de bondad de ajuste “ $F$ ” discutidos también en el Capítulo 3. Seguidamente, a partir de la mejor combinación de parámetros en la modelación *1D* se aplica ahora una modelación *2D* en la zona para afinar el valor del coeficiente “ $n$ ” de Manning, principalmente en la llanura, se aplicó la herramienta computacional Iber v2.3, detallada en el Capítulo 3, utilizando como niveles iniciales los encontrados en la modelación con HEC-RAS v4.1. La modelación *2D* se realiza para el día en el cual se tiene la imagen satelital, mientras que la comparación se realiza a la resolución de la imagen clasificada en la cobertura agua (7m x 7m).

Las condiciones de entrada al sistema están representadas por el hidrograma estimado a partir de la diferencia de los valores reportados en la estación limnimétrica Calamar (sobre el río Magdalena, antes de la derivación del Canal del Dique) y la estación limnimétrica Incora K7 (sobre el Canal del Dique). Este hidrograma se genera para el período de modelación específico propuesto, entre el 22/11/2010 y el 30/01/2012, fechas en las cuales se presentaron respectivamente caudales máximos, asociados a tiempo húmedo, y caudales mínimos asociados a tiempo seco y donde queda inmersa la fecha de la imagen con inundación, descrita anteriormente.

Amador en el año 2013, (Amador, 2013), reporta para este período la Ecuación 27, obtenida para las condiciones de salida aguas abajo de la zona de estudio, en función de los caudales registrados aguas arriba (diferencia entre los caudales en la estación Calamar y los caudales en la estación Incora K7). Esta ecuación se obtuvo a partir de datos de la estación Puerto PIMSA del LEH-Flores, la cual se encuentra en el K38, inmediatamente aguas abajo de la zona escogida para calibración y análisis de sensibilidad. Analizando la

Ecuación 27 y sus datos de referencia (ver Figura 4-15), se aprecia un comportamiento muy similar entre la forma de las curvas de niveles en la estación Calamar (entrada) y en la estación Puerto PIMSA. Esto quiere decir, que cuando los niveles en Calamar aumentan también lo hacen en Puerto PIMSA y cuando bajan en Calamar también en Puerto PIMSA. Lo anterior, puede indicar que, en el K38, en donde se ubica la estación Puerto PIMSA, el efecto de la marea es poco influyente en los niveles medios del río Magdalena y por tanto el comportamiento se puede expresar de forma lineal como lo sugiere la ecuación, la cual reporta un coeficiente de determinación cercano al 0.98. Cabe anotar que, esta expresión es elaborada sin descontar los caudales derivados a las ciénagas ubicadas entre K100 y K38, razón por la cual se debe considerar como una aproximación al comportamiento, teniendo en cuenta la información limitada.



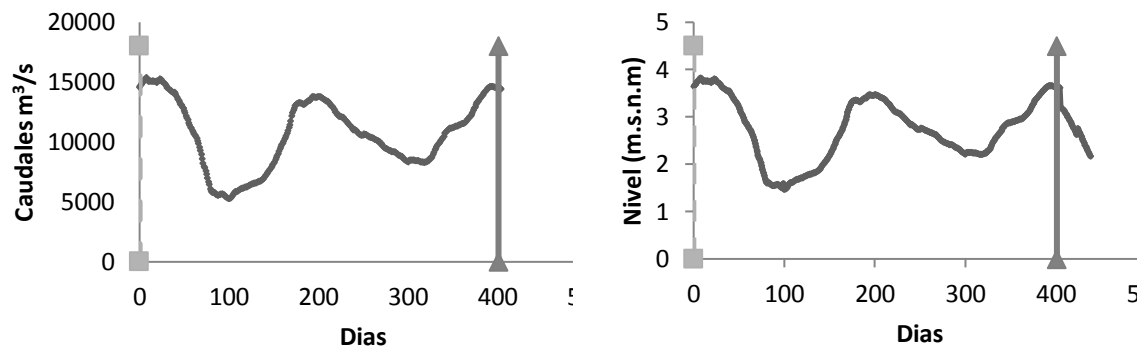
**Figura 4-15:** Gráfica de niveles de agua en las estaciones Calamar y Puerto PIMSA (2010-2012). Fuente: LEH – Flores, plano 17. Ref: E-004-013-12, mayo de 2012.

No obstante, cabe anotar que más aguas abajo esta condición cambia y por tanto esta consideración no aplicaría estrictamente para la totalidad de la zona de estudio hasta el Puente Pumarejo (objeto de la modelación total – zona de estudio) y por esta razón la condición de frontera más adelante tiene un tratamiento diferente. A partir de esta ecuación se establece la condición de frontera aguas abajo, para todas las modelaciones en el escenario de calibración de parámetros. En la Figura 4-16 se presentan las condiciones de entrada y salida utilizadas para la modelación unidimensional con flujo no permanente.

$$h = 0.0007 * Q^{0.8926}$$

Ecuación 27

En donde  $h$  es el nivel del agua en el sector más aguas abajo de la zona de estudio (m) y  $Q$  es el caudal de entrada en el río Magdalena (diferencia Calamar- Incora K7) en  $\text{m}^3/\text{s}$ .



**Figura 4-16:** Hidrograma de caudal en la entrada y relación nivel contra tiempo aguas abajo, para la modelación 1D. La línea con cuadros representa la fecha de la imagen del 22 de octubre de 2010 y la línea con triángulos la imagen del 28 de diciembre de 2011.

Las condiciones iniciales para el caso de la modelación bidimensional (2D) corresponden a los niveles de agua en las ciénagas y el cauce principal, obtenidos a partir de la modelación unidimensional para el día anterior a la fecha de análisis, destacando que debe existir el mismo nivel de referencia altimétrico para estaciones hidrométricas, MDT, etc. Para la condición de frontera aguas abajo en el modelo 2D se establece el nivel reportado en el modelo 1D para el día evaluado (28/12/2011). El hidrograma de entrada presentado en la Figura 4-16 fue elaborado a partir de la información hidrológica, amablemente facilitada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

En síntesis, los mejores parámetros para la zona de estudio se presentan en la Tabla 4-3 y Table 4-4, mientras que el contraste de los mejores resultados sobre la imagen clasificada para el evento ocurrido el 28 de diciembre de 2011, se aprecian en la Figura 4-17.

**Tabla 4-3:** Comparación de resultados *1D* contra imagen clasificada RapidEye (28/12/2011).

<i>n</i> Manning	<i>Cd</i>	<i>F</i> (Dibaldassarre, 2009)	<i>F</i> (Aronica, 2002)	<i>Kappa</i> (Cohen, 1960)
<i>n<sub>c</sub></i> y <i>n<sub>ll</sub></i>				
0.02	1.3	0.33893	0.5608	0.71861
	1.7	0.33893	0.5608	0.71861
0.021	1.3	0.33893	0.5608	0.71861
	1.7	0.33893	0.5608	0.71861
0.022	1.3	0.33893	0.5608	0.71861
	1.7	0.33893	0.5608	0.71861
0.023	1.3	0.33893	0.5609	0.71868
	1.7	0.33893	0.5608	0.71861
0.024	1.3	0.33893	0.5609	0.71868
	1.7	0.33893	0.5609	0.71868
0.025	1.3	0.2795	0.5529	0.71211
	1.7	0.2795	0.5529	0.71211
0.026	1.3	0.2741	0.5455	0.70595
	1.7	0.2741	0.5455	0.70595
0.027	1.3	0.2741	0.5455	0.70595
	1.7	0.2741	0.5455	0.70595
0.028	1.3	0.2741	0.54553	0.70595
	1.7	0.2741	0.54554	0.70595
0.029	1.3	0.2741	0.54553	0.70595
	1.7	0.2741	0.54553	0.70595

Los resultados presentados en la Tabla 4-3, sugieren, de acuerdo con las diversas formulaciones del factor de desempeño utilizado para evaluar los reportes de la modelación hidráulica *1D* contra la imagen clasificada para el día 28 de diciembre de 2011, que independientemente de la formulación, la mejor combinación de parámetros se mantiene dentro de un mismo rango. Por ejemplo, utilizando el factor de desempeño propuesto por (Aronica, Bates, et al., 2002), la mejor combinación del coeficiente de rugosidad “*n*” de Manning en el cauce “*n<sub>c</sub>*”, “*n<sub>ll</sub>*” Manning en la llanura y coeficiente de descarga para el vertedero lateral de pared gruesa “*Cd*”, resulta estar en el rango (0.020 - 0.024), para el coeficiente de Manning y entre 1.30 – 1.70, para el coeficiente “*Cd*”, resultando un valor de 56.08%, mientras que, cuando se usa la expresión propuesta por (Di Baldassarre, Schumann, et al., 2009), el mayor valor obtenido es de 33.89%, con el mismo rango de parámetros. Para el caso del factor *Kappa*, al relacionarse con el factor “*F*” propuesto por (Aronica, Bates, et al., 2002), la mejor combinación se encuentra también en este mismo rango. Las diferencias entre los valores absolutos de los distintos valores de factores de desempeño “*F*” calculados, se deben al castigo de la sobre estimación en el modelo hidráulico realizado en la expresión propuesta por (Di Baldassarre, Schumann, et al.,

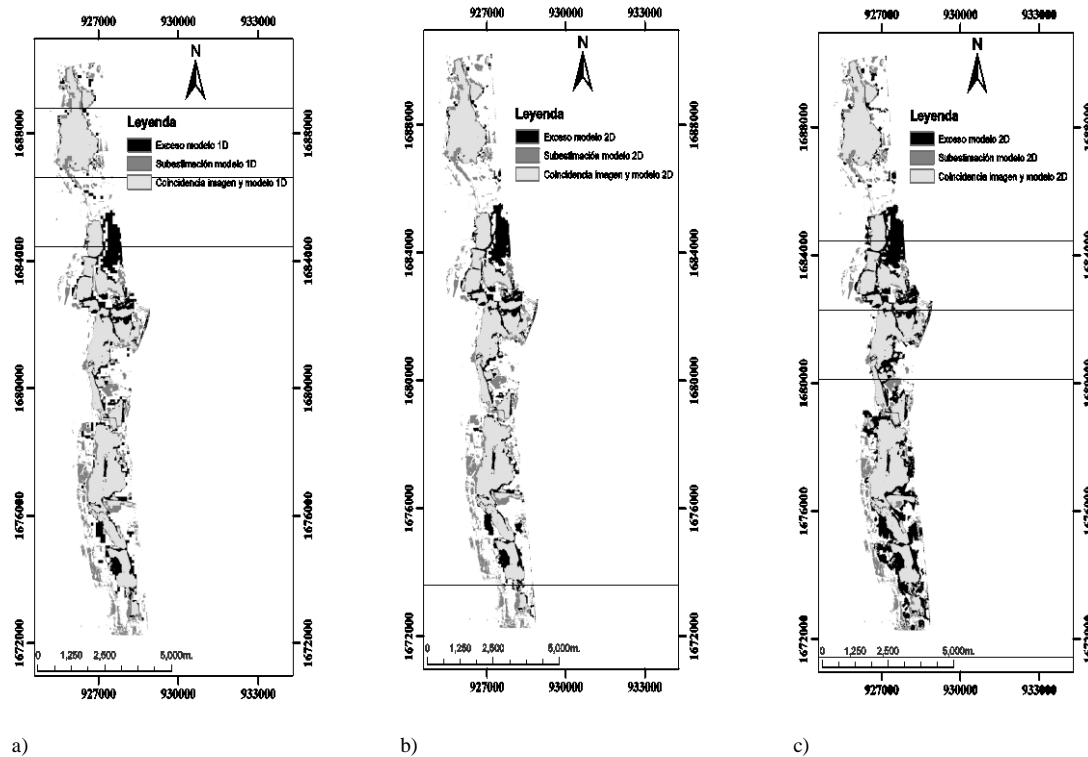
2009). En el caso del coeficiente de descarga su rango no resulta fácilmente identificable, pues con una variación entre los valores extremos reportados, por ejemplo (1.30 – 1.70), (Sturm, 2001), para un vertedero rectangular de cresta ancha, los valores del factor de desempeño “ $F$ ” resultan invariables. Esto sugeriría inicialmente que el resultado de la mancha de inundación es independiente del valor utilizado para “ $C_d$ ” en la modelación (1D); sin embargo, según (Hunter, Bates, et al., 2007), cuando la inundación se ve limitada principalmente por defensas (como es el caso para el área de estudio, que tiene diques de defensa en algunas zonas), grandes cambios en los niveles de agua pueden producir solo pequeños cambios en la extensión de la inundación lateral y por tanto en estos casos el patrón de inundación no representa bien el fenómeno, mientras que, dependiendo de la resolución en la imagen utilizada, pequeñas variaciones en la elevación de la superficie pueden generar grandes cambios en la extensión de la inundación o por el contrario no ser registrados. Lo anterior, claramente constituye una limitación al proceso.

**Tabla 4-4:** Comparación de resultados 2D contra imagen clasificada RapidEye (28/12/2011).

$n$ Manning $n_c$	$n_{II} 1$	$n_{II} 2$	$F$ (Dibaldasarre, 2009)	$F$ (Aronica, 2002)	$Kappa$ (Cohen, 1960)
0.02	0.020	0.02	0.33781	0.56082	0.71862
	0.028	0.028	0.34171	0.56195	0.71955
	0.028	0.032	0.34192	0.56195	0.71955
	0.032	0.032	0.33893	0.56195	0.71955
0.022	0.022	0.022	0.33333	0.55986	0.71783
	0.028	0.028	0.33579	0.56062	0.71846
	0.028	0.032	0.33633	0.56076	0.71857
	0.032	0.032	0.33785	0.56111	0.71886
0.024	0.024	0.024	0.3173	0.56054	0.71839
	0.028	0.028	0.31973	0.56134	0.71905
	0.028	0.032	0.31889	0.56122	0.71895
	0.032	0.032	0.31825	0.56113	0.71888
0.025	0.025	0.025	0.30896	0.55797	0.71628
	0.028	0.028	0.30984	0.55819	0.71646
	0.028	0.032	0.30932	0.55798	0.71629
	0.032	0.032	0.30931	0.5579	0.71622
0.028	0.028	0.028	0.25677	0.54755	0.70763
	0.028	0.032	0.25719	0.54768	0.70774
	0.032	0.032	0.25733	0.54777	0.70782
0.032	0.028	0.028	0.23989	0.54362	0.70434
	0.028	0.032	0.23869	0.54316	0.70396
	0.032	0.032	0.23945	0.5432	0.70399
0.036	0.028	0.028	0.20514	0.53407	0.69628
	0.028	0.032	0.20554	0.53425	0.69643
	0.032	0.032	0.20675	0.53459	0.69672
	0.036	0.036	0.2091	0.53527	0.6973

En la Tabla 4-4, para el caso de la modelación bidimensional, se pueden apreciar más diferencias entre las combinaciones “n” de Manning del cauce “ $n_c$ ” y llanura “ $n_{l1}$ ,  $n_{l2}$ ”. Sin embargo, el valor del factor de desempeño “F” se encuentra en el rango definido desde la modelación 1D, es decir, entre valores de “n” de Manning en el cauce (0.020 – 0.024), mientras que a valores más altos de rugosidad en el cauce el valor del factor “F” disminuye, debido a los excesos en la representación de la mancha de inundación. De igual forma se aprecia una coincidencia entre los máximos valores absolutos del factor de desempeño, en donde el mejor valor del factor “F” según (Di Baldassarre, Schumann, et al., 2009), se presenta para una combinación del valor rugosidad “n” de Manning de cauce “ $n_c$ ” y llanuras “ $n_{l1}$ ,  $n_{l2}$ ” de 0.020, 0.028 y 0.032, respectivamente; al aplicar el factor “F” propuesto por (Aronica, Bates, et al., 2002), la mejor combinación resultó ser la misma. Se pudo establecer además que para la modelación 2D los resultados de la mancha de inundación de algunas ciénagas se ven obviamente influenciados por la condición inicial “nivel de agua” impuesta a partir de los resultados obtenidos de la modelación 1D, debido a que la modelación 2D considera la totalidad del terreno a partir del MDT y la resolución de éste 30 x 30 m en algunos casos, no permitió representar de forma adecuada las interconexiones entre ciénagas, por lo que éstas permanecen con el valor inicial de lámina de agua invariable en el tiempo. En este estudio, la batimetría del canal principal, realizada por el LEH – Cormagdalena (2014), fue complementada con información proveniente del modelo digital de Terreno (MDT) con resolución de 30 m (ASTERGDEM).

Por su parte, la Figura 4-17 muestra la diferencia entre los mejores resultados de los factores de bondad de ajuste “F” en los modelos hidráulicos 1D y 2D, figuras a y b respectivamente, y el peor resultado de todas las modelaciones figura c. El mejor resultado corresponde a la combinación  $n_c=0.020$ ,  $n_{l1}=0.028$ , y  $n_{l2} = 0.032$ ,  $m^{-1/3}s$ , con la cual se obtuvo una medida de desempeño “F” del 56.20% con la expresión propuesta por Aronica, del 34.19% con la expresión propuesta por Di Baldassarre y del 71.95% según el parámetro *Kappa* (Figura 4-17 (b)). A partir de esta combinación de rugosidades se realizaron las modelaciones en una y dos dimensiones para toda la zona de estudio considerada inundable, teniendo en cuenta que se presentan características de coberturas vegetales muy homogéneas en casi toda la zona baja del hidrosistema regional.



**Figura 4-17:** Resultados: (a) Imagen 28/12/2011 vs resultado de modelación 1D ( $n_c$  y  $n_{II} = 0.020$ ) - medida de desempeño  $F(\text{Aronica}) = 56.08\%$ , (b) Imagen 28/12/2011 vs resultado de modelación 2D ( $n_c = 0.020$ ,  $n_{II1} = 0.028$ ,  $n_{II2} = 0.032$ ) - medida de desempeño  $F(\text{Aronica}) = 56.20\%$ , (c) Imagen 28/12/2011 vs resultado de modelación 2D ( $n_c = 0.036$ ,  $n_{II1} = 0.036$ ,  $n_{II2} = 0.036$ ) - medida de desempeño  $F(\text{Aronica}) = 53.52\%$ .

#### 4.2.2 Modelación hidráulica zona general de estudio

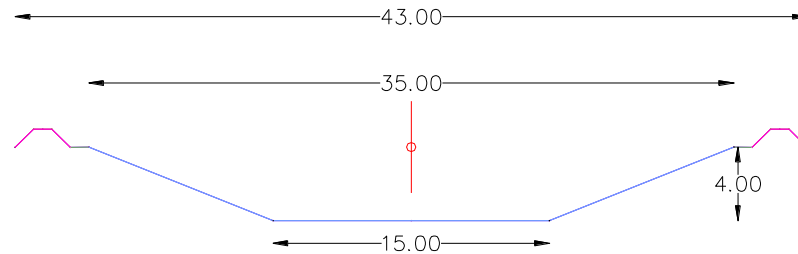
Como fue discutido anteriormente, para el análisis de intercambios hídricos se realiza la modelación matemática en una dimensión (1D), utilizando para ello los mejores parámetros de rugosidad del cauce principal y llanura, encontrados dentro del análisis descrito en el ítem anterior; la razón por la cual se decide evaluar los interflujos entre el río Magdalena y las múltiples ciénagas circundantes a partir de un modelo 1D, obedece principalmente a la demanda computacional para una zona de análisis tan grande (estimada aproximadamente en 2,500 km<sup>2</sup> en lo que respecta a la hidráulica río - ciénagas), lo cual, en el caso de la modelación 2D requeriría de tamaños o discretización de celdas grandes, superiores a 90m, con las cuales no sería posible la representación de los caños menores en la zona, que reportan anchos del orden de 30m (ver Figura 4-18). En el caso de la

modelación de inundaciones, la modelación *2D* en toda la zona se considera aplicable siempre y cuando se realice para el cauce principal (el río Magdalena) y sus zonas aferentes, a través de un *buffer* que tenga como límite la extensión de ciénagas directamente conectadas al mismo.

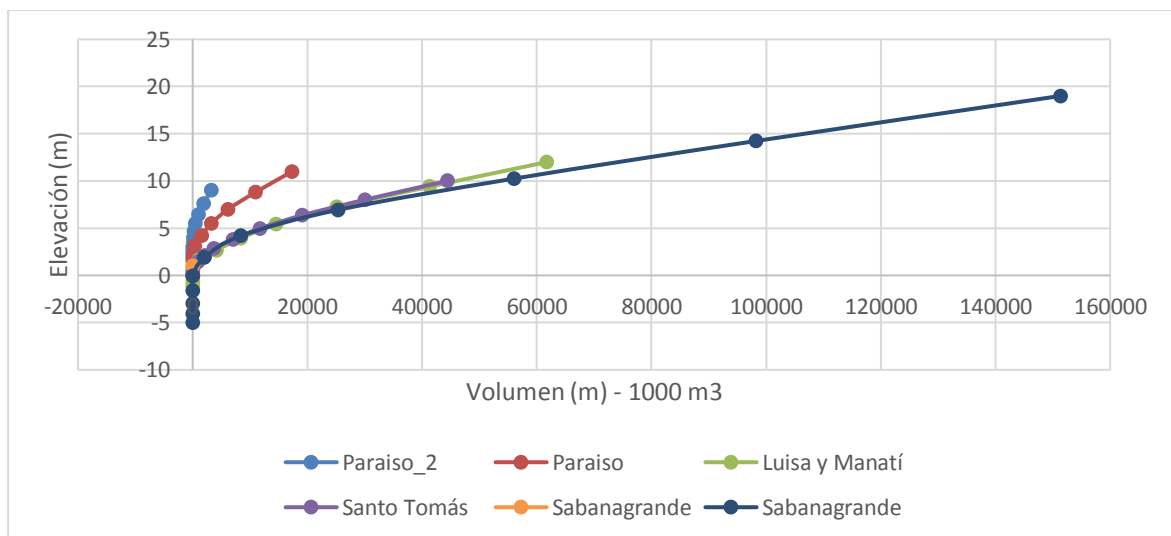
El modelo *1D* (HEC RAS V4.1) fue implementado en la totalidad de la zona de estudio, para lo cual se utilizó la extensión HEC-GeoRAS, que se ejecuta sobre ArcGIS de ESRI y es extremadamente útil para la generación de la topología del proyecto y el post-proceso en el caso de generación y análisis de la mancha de inundación. El montaje del modelo requirió en primera medida, la integración de toda la información topobatimétrica disponible en la zona y que fue posible adquirir en esta investigación. La integración de la información se realizó utilizando como base el Modelo Digital de Terreno ASTERGDEM 30 x 30m, discutido en el Capítulo 3. A partir de este insumo (gratuito), la información de batimetría del río Magdalena, la información de los caños conectados al río (caño Renegado, caño Aguas Negras, caño Clarín), y la información de las ciénagas, se logró establecer la mejor superficie del terreno, es decir el mejor hidroDEM, para la zona general de estudio. Sobre los caños conectados al río Magdalena al igual que muchas ciénagas principalmente del costado oriental, tales como: Complejo cenagoso Pajalar, Ciénaga Buenavista, Ciénaga San Antonio, entre otros y del costado occidental : complejo cenagoso Uvero y otras, cabe comentar que no fue posible adquirir la información de batimetría, por esta razón, se decidió ante la carencia de información, representar los caños utilizando la geometría reportada en los diseños iniciales de éstos, (Deeb A., 1993); ver Figura 4-18, mientras que en el caso de las ciénagas, éstas se incisaron sobre el DTM utilizando una cota promedio de -2.00 m.s.n.m., teniendo en cuenta que 2 m fue un promedio de la profundidad más baja encontrada en las ciénagas de las cuales se tuvo información hacia el costado occidental (ver Figura 4-19), y en la información consultada sobre la CGSM, se reporta también una profundidad máxima de 2.00 m. (Díaz-Granados, Camacho, et al., 1996). Todo el procedimiento de ajuste del hidroDEM fue realizado con ayuda de un SIG (*ArcG/S*), en el cual después de un proceso de prueba – error donde se generaron diferentes MDT con resoluciones distintas, se encontró que el mejor tamaño de celda del raster corresponde a un MDT de 5 x 5m, teniendo como criterio una adecuada representación de la batimetría del río Magdalena con la mayor celda posible, además, para el caso de los



caños de derivación, este tamaño de celda permite tener mínimo 6 puntos para definir el cauce en el modelo hidráulico  $1D$ , permitiendo un adecuado balance entre la información disponible y el tiempo computacional requerido.



**Figura 4-18:** Sección transversal típica para los caños Renegado, Aguas Negras y Clarín. Fuente: Adaptado de (CORPAMAG-DNP-PROCIÉNAGA, 1993).

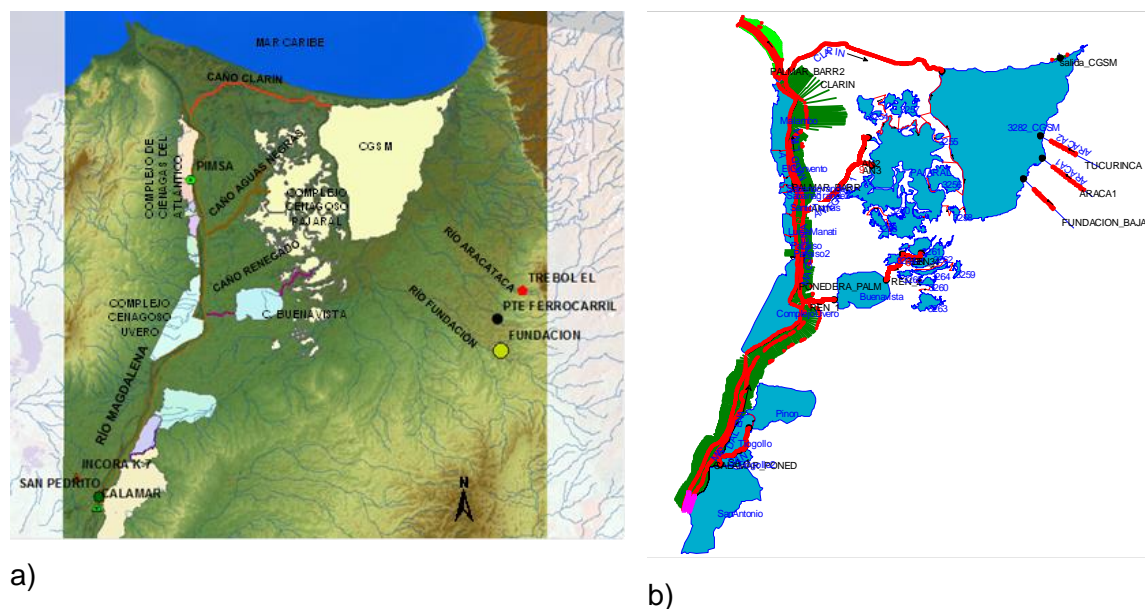


**Figura 4-19:** Curvas nivel vs almacenamiento en ciénagas con batimetría (costado occidental). Fuente: Elaboración propia.

En el infograma presentado en la Figura 4-21 se realiza la contextualización del modelo hidráulico  $1D$ , donde se destacan las conexiones de los caños Renegado, Aguas Negras y Clarín, representados en el modelo como una unión (junction), las interconexiones entre las ciénagas y entre el río Magdalena y las ciénagas circundantes a él, representadas a través de una estructura de vertedero lateral de cresta ancha, el cual posibilita el cálculo de los intercambios y representa en algunos casos la presencia de diques generados por pobladores, principalmente en las ciénagas del costado occidental de río Magdalena donde

sí fue posible contar con la ubicación y dimensión de los mismos (Departamento del Atlántico).

En total se incluyeron en la modelación hidráulica 1D, 31 ciénagas, las más representativas por tamaño, los 3 caños descritos anteriormente (aproximadamente 70 km), 4 afluentes a la CGSM, 16 cuencas aportantes a las ciénagas y el río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza (aproximadamente 80 km, entre el K20 ubicado aguas abajo del Puente Pumarejo y el K100 inmediatamente después de la derivación del Canal del Dique), ver Figura 4-20.



**Figura 4-20:** a) MDT conformado con la información secundaria (representación global) y topobatimetría del cauce principal y cuerpos de agua (ciénagas más representativas). b) Representación en modelo hidrodinámico 1D (HEC RAS V4.1).

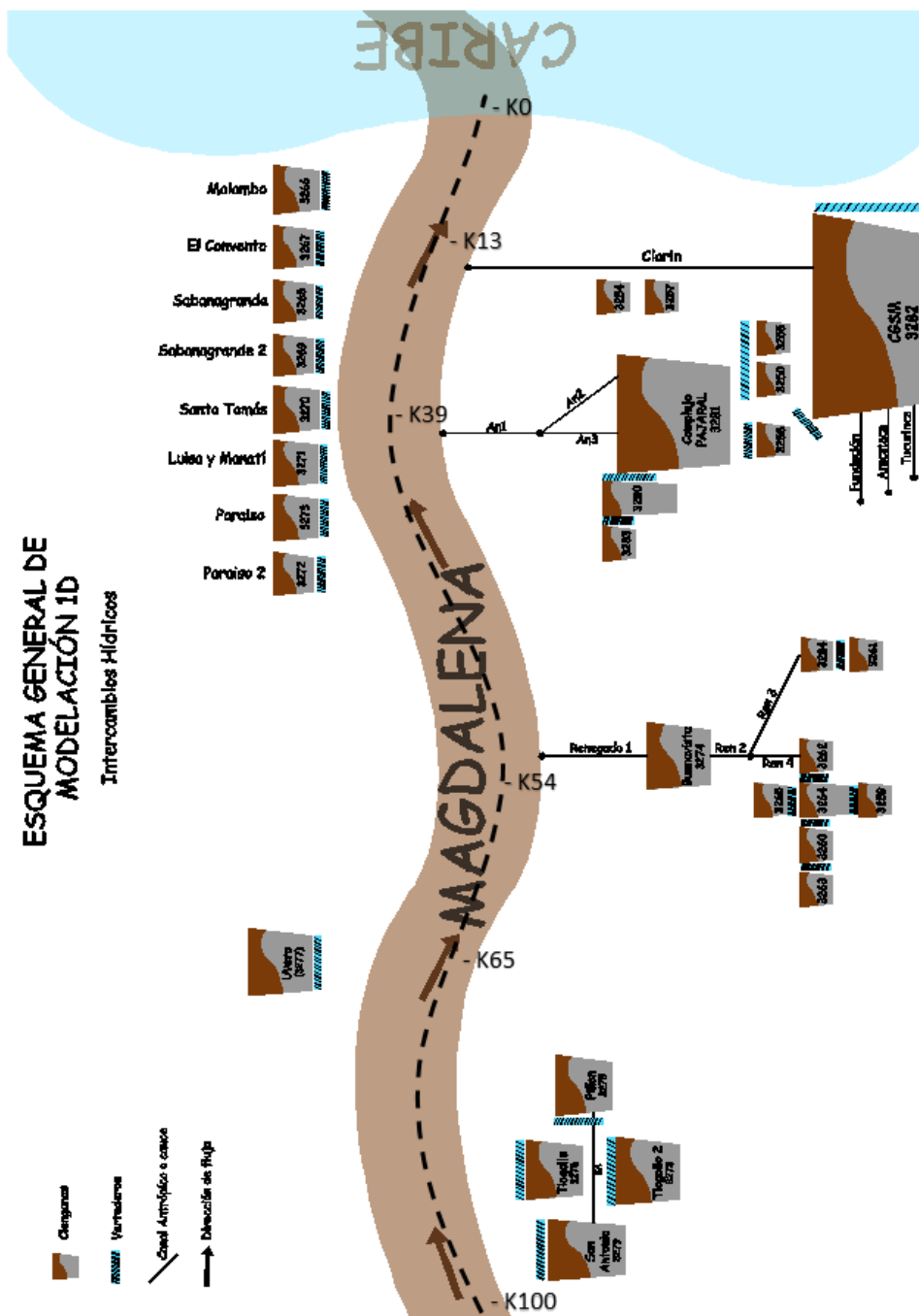
En el caso del río Magdalena la información del Puente Pumarejo K20 hacia aguas abajo, se representó utilizando como base las últimas secciones de la cual se tuvo información batimétrica, dado que la información de batimetría levantada por la Universidad Nacional sede Bogotá, para CORMAGDALENA, y amablemente suministrada para esta investigación, inicia desde este puente hacia aguas arriba. La extensión de esta información hacia aguas abajo se realiza por la necesidad de incluir las derivaciones o

entradas desde el caño Clarín que se encuentra en el K13 del río, aproximadamente. En consecuencia, las secciones transversales generadas en la modelación ascienden a más de 2,700, estas secciones se generaron cada 100 metros, y en algunos casos para procurar la estabilidad numérica de la modelación (cumplir condición de *Courant*) fueron cada 10m, principalmente en el caso de los caños. La razón estas secciones es buscar representar la mayor cantidad de información posible en los cauces en balance con la demanda computacional y se realizó directamente con ayuda de HEC - GeoRAS.

La condición de frontera aguas arriba se definió como la diferencia entre los registros de caudal de la estación Calamar (29037020) ubicada sobre el río Magdalena y la estación Incora K7 (29037360) ubicada sobre el Canal del Dique, como ha sido comentado anteriormente. La condición de frontera aguas abajo resultó ser más compleja de definir, por la falta de información; la importancia de esta radica en la necesidad de poder representar en el hidrosistema el efecto de la marea proveniente del Mar Caribe. Para ello se contó con los datos de la estación limnimétrica Dársena Barranquilla (29047080), ubicada aguas abajo del Puente Pumarejo, aproximadamente en el K18 del río Magdalena, la cual tiene información de niveles medios del río a partir del año 2008. Esta estación resultó ser la mejor opción para la condición de frontera aguas abajo ya que representa el cierre del sistema modelado y por tanto delimita el período de análisis de la modelación hidráulica entre 2008 – 2011, pues en esta fecha se tienen caudales medios de entrada y niveles medios de salida en el Bajo Magdalena. Al representar los caudales de entrada vs los niveles en la estación Dársena Barranquilla, Figura 4-22, es posible apreciar un comportamiento casi lineal entre el hidrograma de entrada y los niveles en la salida, mostrando que cuando los caudales de entrada son altos los niveles de salida también lo son, lo cual sugiere que aún en el K18, condición de frontera aguas abajo, no se evidencia efecto de marea o es poco perceptible, lo cual es complementado con la Figura 4-23 donde el factor de correlación es 0.94, muy cercano a 1.0.

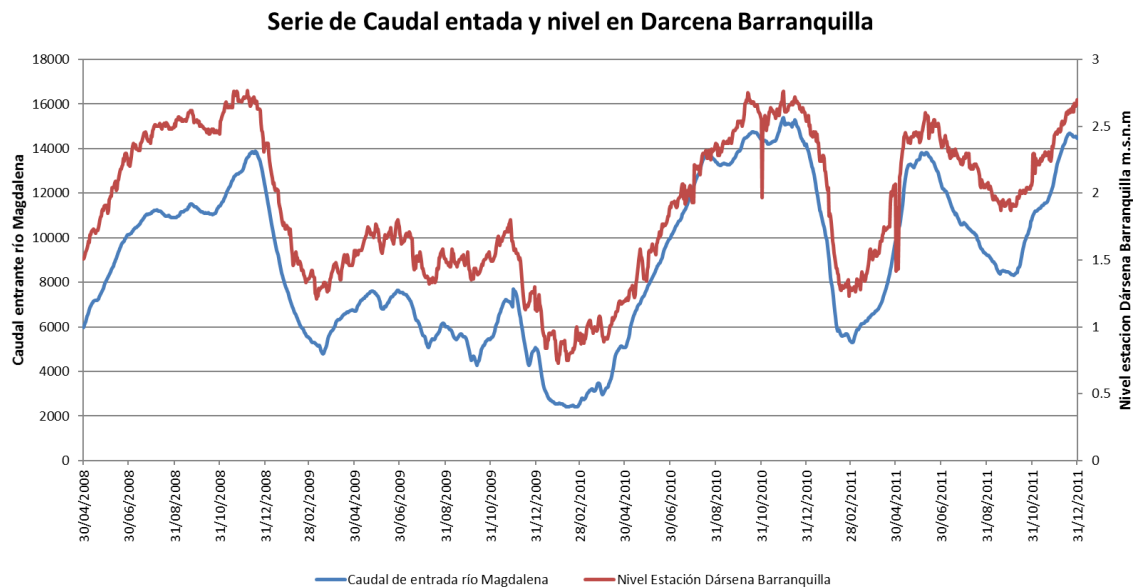
De otra parte, a través del análisis de frecuencia realizado a las estaciones Calamar e Incora K7, ubicadas sobre río Magdalena y el Canal del Dique respectivamente, se establecen los caudales esperados para los diferentes períodos de retorno ( $T_r$ ). Estos caudales resultan de gran utilidad al momento de ser asociados con los presentados en el río Magdalena, permitiendo establecer la cobertura o mancha de inundación a partir de la

modelación hidráulica, insumo requerido para la aplicabilidad de la metodología propuesta en la Figura 3-16.

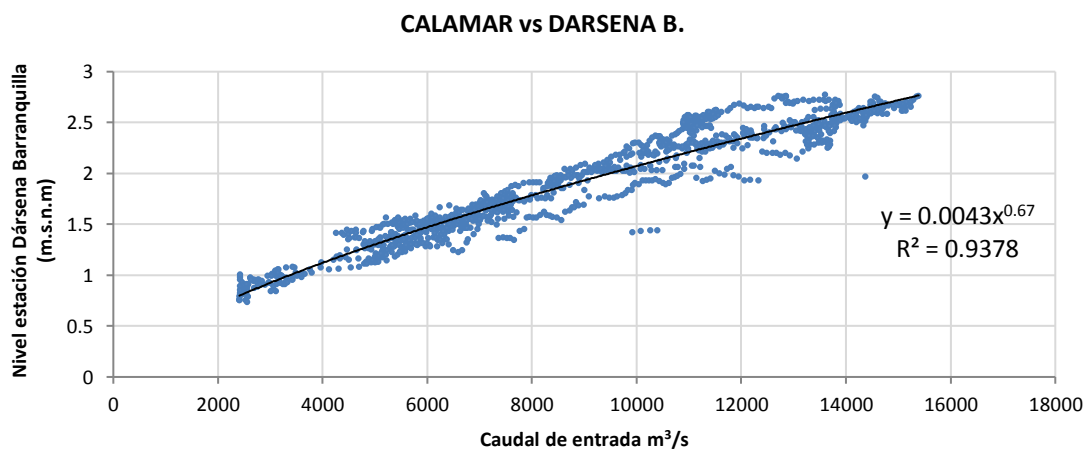


**Figura 4-21:** Infograma de modelación 1D (HEC-RAS V4.1) en la zona general de estudio.

La condición de frontera aguas abajo merece un tratamiento particular, no tanto así la condición de frontera a la entrada, definida a partir del principio de continuidad como la diferencia de los valores de caudal entre la estación Calamar e Incora K7.



**Figura 4-22:** Caudal de entrada Vs. niveles en la salida del área general de estudio.

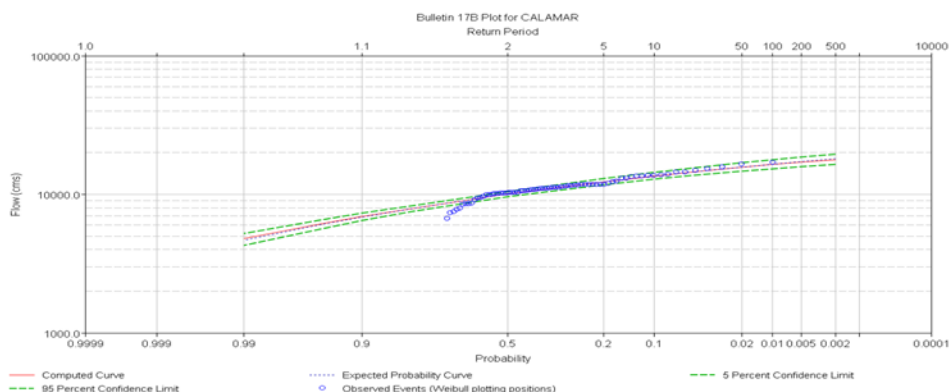


**Figura 4-23:** Relación caudal de entrada (*Calamar-Incora K7*) Vs. niveles en la salida del área general de estudio.

Adicionalmente, se realizó el análisis de frecuencias de los registros de caudal en las estaciones hidrométricas analizadas, para establecer caudales asociados a períodos de retorno y con ello las zonas susceptibles a inundación. Este fue llevado a cabo

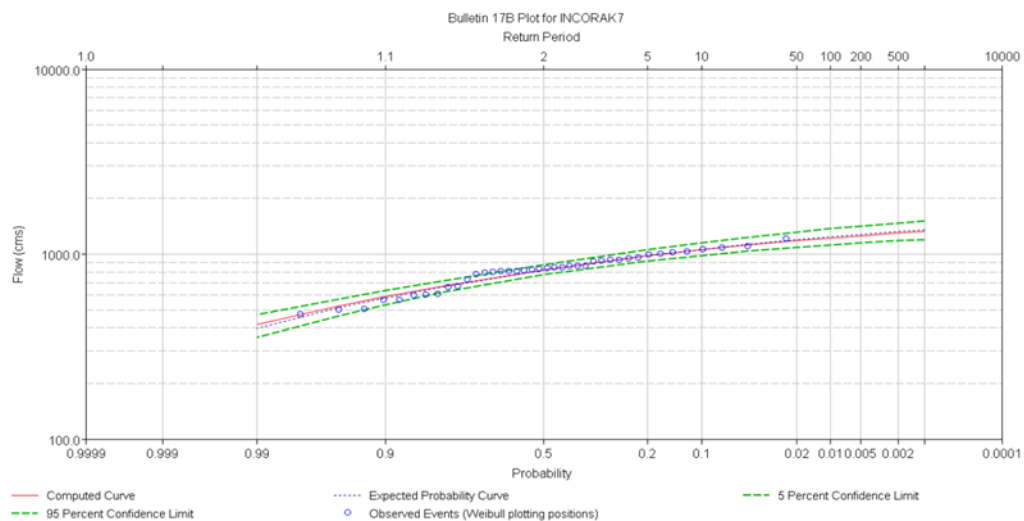
implementando la herramienta computacional HEC – SSP v1.1. (Statistical Software Package), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Esta herramienta se basa en la metodología detallada por el (U.S. Water Resources Council, 1982) y los resultados de esta aplicación se presentan a continuación:

- Estación Calamar (209037020): La estación limnimétrica Calamar (LM) representa quizás el registro hidrológico más completo con que cuenta la zona de estudio, ya que registra datos desde el año 1940 hasta la actualidad; a través del convenio IDEAM – UNAL se pudo tener acceso a esta información hasta el primer semestre del año 2012. La estación Calamar está ubicada en el extremo inmediatamente aguas arriba de la derivación del Canal del Dique y hasta hace poco fue la última estación del IDEAM sobre el río Magdalena en este sector. Recientemente (2010), el IDEAM instaló aguas abajo de esta estación, después de la derivación del Canal de Dique, la estación automática limnigráfica (LG) San Pedrito; sin embargo, la información de esta última estación no estuvo disponible para los propósitos del estudio aquí reportado. En la Figura 4-24 se resume el análisis de frecuencia de valores extremos elaborado con valores máximos anuales entre 1940 y 2011. Se aprecia que los valores reportados en esta estación han llegado incluso hasta un período de retorno cercano a 100 años, con un valor cercano de  $16,913 \text{ m}^3/\text{s}$  reportado para el año en 1975. El caudal máximo reportado durante la denominada ola invernal de 2010 – 2011,  $16,343 \text{ m}^3/\text{s}$ , fue también extraordinario y asociado con un Tr de 50 años.



**Figura 4-24:** Análisis de frecuencia de valores extremos en la estación Calamar a partir de análisis de la serie anual de excedencias (período 1940 – 2011).

- Estación Incora K7 (29067360): La estación limnimétrica Incora K7 (LM) registra el caudal derivado del río Magdalena a través del Canal del Dique. Cuenta con información desde el año 1972 hasta la actualidad; a través del convenio IDEAM – UNAL se tuvo acceso a esta información también hasta el primer semestre del año 2012. Si bien estrictamente hablando esta no se encuentra sobre el río Magdalena, es fundamental para establecer el caudal de entrada al área particular de estudio después del caudal derivado a través del Canal del Dique, cerca del 7%, esto se realiza de forma directa aplicando el principio de conservación de masa o resta de los valores de caudal de las dos estaciones para fechas coincidentes. En la Figura 4-25 el caudal de período de retorno de 100 años se estima en 1323 m<sup>3</sup>/s con una variación de (+/-) 150 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 4-25:** Análisis de frecuencia de valores extremos en la estación Incora K7 a partir de valores medios máximos anuales (período 1972 – 2011).

Los caudales entrantes a la zona de estudio para los períodos de retorno de 5, 10, 50, y 100 años, son resumidos en la Tabla 4-5, para el período de retorno más comúnmente utilizado en el país (Tr 100 años) se puede esperar en la estación Calamar un caudal aproximado de 18,100 m<sup>3</sup>/s (el máximo del intervalo de confianza), mientras que en la estación Incora K7 este caudal sería aproximadamente de 1,400 m<sup>3</sup>/s; por consiguiente, el caudal entrante en la zona de estudio sería del orden de 16,700 m<sup>3</sup>/s, para este período. Acorde, en orden de magnitud, con el caudal entrante a la zona de estudio reportado por (Amador, 2013), quien reporta un valor de 16,069 m<sup>3</sup>/s y con los caudales reportados por (Consortio Dique, 2005), donde se reporta un caudal de 18,429 m<sup>3</sup>/s en Calamar y 1,322 m<sup>3</sup>/s en Incora K7, es decir 17,107 m<sup>3</sup>/s hacia el área de estudio. De otra parte, producto

de aplicar la ecuación de regionalización desarrollada por el (IDEAM, 1995) y reportada en el Capítulo 2, en la Tabla 4-6 se presentan los caudales máximos esperados en las cuencas aferentes pertenecientes al hidrosistema de estudio en la margen derecha (departamento del Magdalena) y en la margen izquierda (departamento del Atlántico); estas últimas cuencas prioritariamente con descargas directas al río Magdalena. Un comparativo entre las Tabla 4-5 y Tabla 4-6 permite establecer que las inundaciones en la zona son principalmente debidas al caudal de entrada en el río Magdalena después de la derivación del canal del dique, dadas las magnitudes de este caudal en comparación con los máximos estimados para las áreas aferentes a las ciénagas, y que eventualmente para efectos de inundación puede ser omitido este caudal aportante de cuencas en la elaboración de mapas de inundación, teniendo en cuenta además que estos picos llegan a las ciénagas y dependiendo del nivel en las mismas son atenuados cuando transitan estas antes de entregar al río Magdalena. No se incluyen entonces los caudales de cuencas para el análisis hidráulico de inundaciones.

Así, la exigencia computacional para cada uno de los modelos hidráulicos implementado en la zona y sus principales características se resume en la Tabla 4-7, el computador utilizado fue Core i 7, RAM 12. Mientras que los productos: intercambios hídricos y manchas de inundación, se presentan en el anexo 2 y se discuten los resultados en el Capítulo 5. Los órdenes de Magnitud de caudales en el río Magdalena superan notablemente la sumatoria de caudales en todas las cuencas aportantes de la margen izquierda, estos últimos en su totalidad, constituyendo un máximo del 28% del caudal del río para todos los períodos de retorno.

**Tabla 4-5:** Caudales entrantes a la zona de estudio para diferentes períodos de retorno en el río Magdalena.

Estación	Tr 2.33	Tr 5	Tr 10	Tr 50	Tr 100	Tr 500
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
Calamar	10500	12000	13500	16000	18100	19000
Incora K7	900	1000	1050	1300	1400	1500
<b>Q entrante al sistema</b>	<b>9600</b>	<b>11000</b>	<b>12450</b>	<b>14700</b>	<b>16700</b>	<b>17500</b>



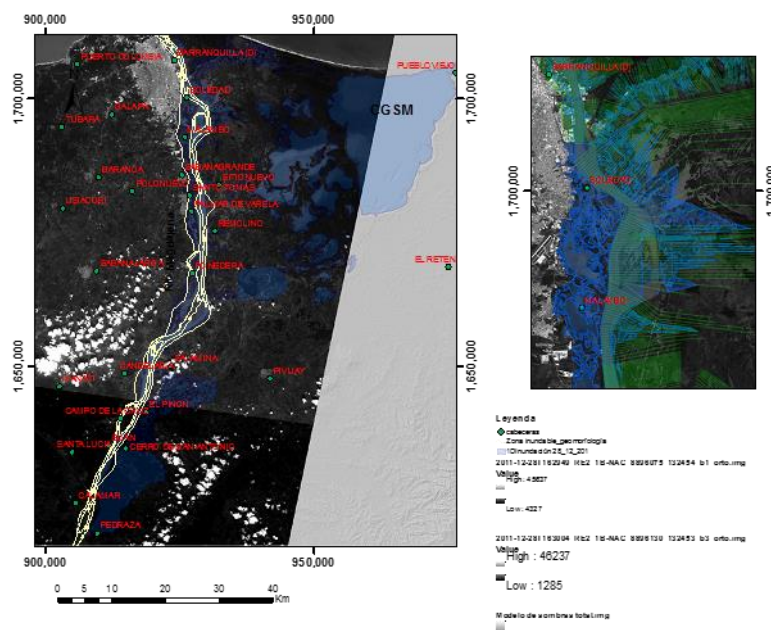
**Tabla 4-6:** Caudales en las cuencas del Bajo Magdalena para diferentes períodos de retorno.

ID	Departamento	Area (km <sup>2</sup> )	CAUDAL EC. REGIONALIZACIÓN						$Q_{2.33} = 84.39A^{0.12}$
			Tr 2 (m <sup>3</sup> /S)	Tr 2.33 (m <sup>3</sup> /S)	Tr 5 (m <sup>3</sup> /S)	Tr 10 (m <sup>3</sup> /S)	Tr 50 (m <sup>3</sup> /S)	Tr 100 (m <sup>3</sup> /S)	
2	Magdalena	393.4	160.06	172.85	228.51	273.97	373.70	416.05	
4	Magdalena	476.7	163.79	176.88	233.84	280.36	382.42	425.75	
8	Magdalena	532.3	165.97	179.24	236.95	284.09	387.51	431.43	
12	Magdalena	112.5	137.73	148.74	196.63	235.75	321.58	358.02	
13	Magdalena	752.1	173.00	186.83	246.99	296.12	403.92	449.70	
16	Magdalena	193.9	147.03	158.78	209.91	251.67	343.29	382.19	
17	Magdalena	89.39	133.99	144.69	191.28	229.34	312.82	348.27	
18	Magdalena	2336	198.21	214.05	282.97	339.26	462.77	515.21	
19	Magdalena	1073	180.54	194.97	257.75	309.02	421.52	469.29	
21	Magdalena	185.2	146.22	157.91	208.76	250.29	341.40	380.09	
26	Magdalena	147.7	142.31	153.68	203.16	243.58	332.26	369.91	
32	Magdalena	41.67	122.26	132.03	174.54	209.27	285.45	317.79	
34	Magdalena	680.8	170.95	184.61	244.05	292.61	399.13	444.35	
51	Magdalena	34.91	119.69	129.25	170.87	204.87	279.45	311.12	
52	Atlántico	63.59	128.62	138.90	183.62	220.15	300.30	334.33	
53	Atlántico	53.24	125.91	135.97	179.75	215.51	293.96	327.28	
54	Atlántico	115.3	138.14	149.18	197.22	236.45	322.53	359.08	
55	Atlántico	67.03	129.44	139.78	184.79	221.55	302.20	336.45	
56	Atlántico	90.67	134.21	144.94	191.61	229.73	313.36	348.87	
57	Atlántico	103.7	136.39	147.29	194.72	233.46	318.45	354.54	
58	Atlántico	99.5	135.72	146.56	193.76	232.31	316.87	352.78	
59	Atlántico	108.1	137.08	148.03	195.70	234.63	320.04	356.31	
60	Atlántico	207.2	148.21	160.05	211.59	253.68	346.03	385.24	
61	Atlántico	55.35	126.50	136.60	180.59	216.52	295.34	328.81	
62	Atlántico	31.36	118.16	127.60	168.69	202.25	275.87	307.14	
63	Atlántico	85.07	133.19	143.83	190.15	227.98	310.97	346.21	
64	Atlántico	72.36	130.63	141.07	186.49	223.59	304.99	339.55	

**Tabla 4-7:** Exigencia computacional de la modelación hidráulica implementada.

Modelación / herramienta	Características principales	HidroDEM	Periodo de modelación	Exigencia computacional
1D HEC RAS v 4.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Longitud de cauces = 160 Km</li> <li>Secciones transversales cada = 100 m</li> <li>Ciénagas = 31 unidades</li> </ul>	10x10 (m)	01/01/ 2009 - 01/02/2012 3 años (1095 días)	18 - 24 horas
2D IBER v 2.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Longitud de cauces = 80 Km</li> <li>Área aferente = Buffer 2Km</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>30 x 30 (m) Cauce principal</li> <li>90 x 90 (m) área aferente</li> </ul>	Evento (1día)	24 horas

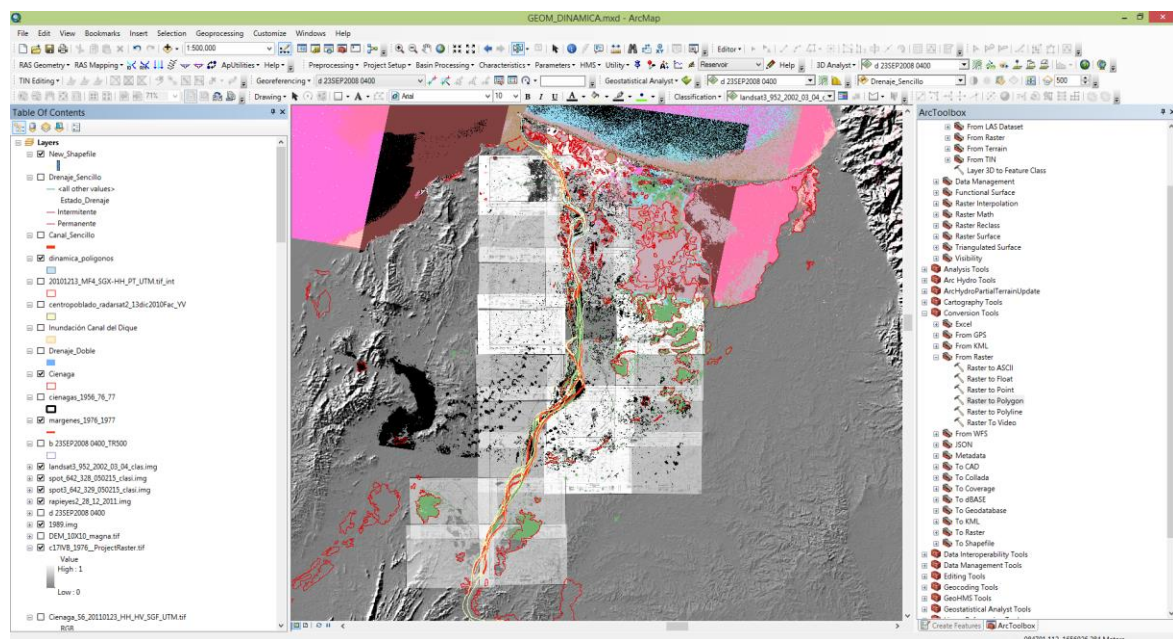
Conocidas las características de la modelación 1D o 2D, se evalúa el resultado de esta a partir de la comparación con una imagen de referencia. Se contó con una imagen producto del sensor Rapideye, tomada para el día 28/12/2011. Es decir, la modelación elaborada en todo el período de estudio (modelo 1D), se detiene en la fecha característica de la imagen referente, se evalúa el resultado de la mancha de inundación y se compara la capacidad de representación de esta. En la Figura 4-26 se aprecia cómo el modelo hidráulico 1D, logra representar con cierta limitación la zona de desborde reportada para el día de análisis; sin embargo, no es posible apreciar toda la evolución de la lámina de agua a través de la llanura de inundación, esta limitación se tiene también con la modelación 2D, dado que no se pudo validar la información del MDT ASTER-GDEM utilizado en la elaboración del hidroDEM Vs. la topografía existente en la zona para la fecha de modelación, puesto que se aprecian cambios en las morfometrías de las zonas de inundación que el MDT no representa adecuadamente, limitando la evaluación del parámetro “ $F$ ” en toda la zona. Se consideran entonces aceptables los resultados de la modelación matemática a partir de la comparación visual de la mancha de inundación en la zona aledaña al cauce principal del río Magdalena. pero aún no concluyentes debido a lo grueso de la información topográfica principalmente en la zona de orillas.



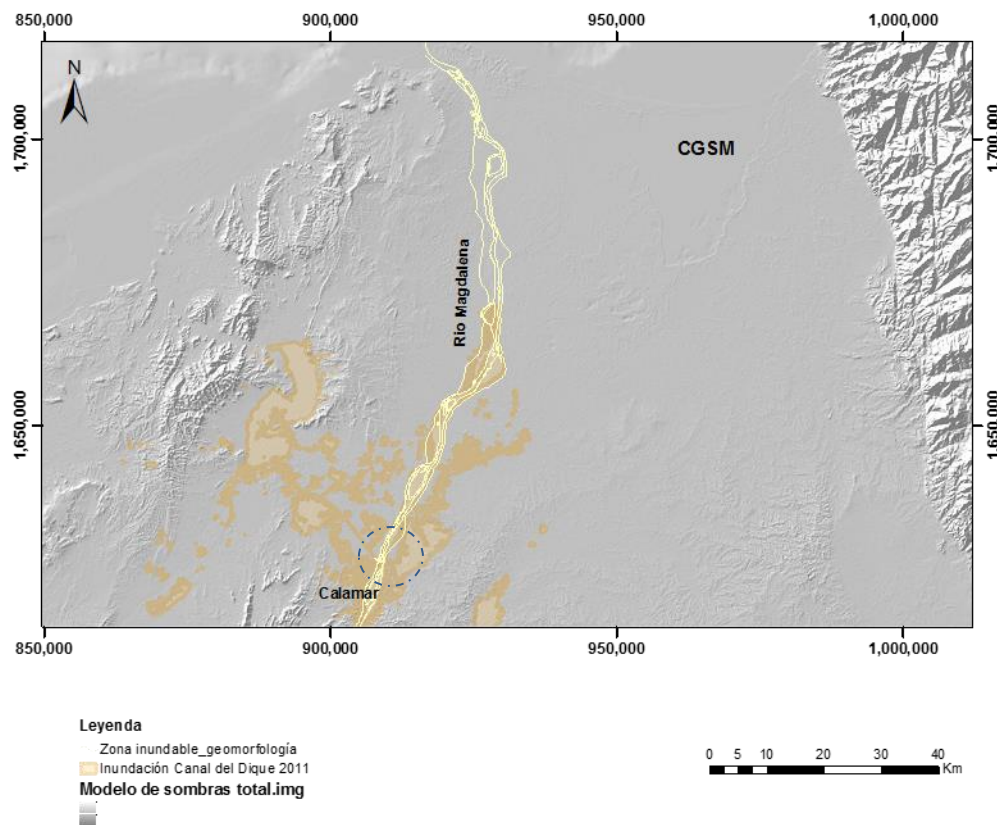
**Figura 4-26:** Comparación resultado de inundación en el modelo 1D Vs imagen satelital sensor RapidEye 28/12/2011.

### 4.3 Dinámica fluvial de la zona de estudio

Implementar la metodología resumida en la Figura 3-15 requirió establecer como referencia inicial la cartografía 1:25000, años 1959, 1976 y 1977, proporcionada por el IGAC, esta información fue georreferenciada y posteriormente con la ayuda de un SIG se contrastó con los resultados de la clasificación no supervisada realizada a las imágenes referenciadas en la Tabla 2-2, sensores Landsat TM y ETM, RapidEye, Radarsat, Spot y CosmoSkymed, en aras de establecer el cauce histórico con criterio geomorfológico. El proceso de dinámica fluvial en el río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza se resume en la Figura 4-27 y el cauce histórico, resultado de este proceso, se presenta en la Figura 4-28. Este producto, se compara con los resultados de la modelación matemática en hidráulica para establecer la delimitación de zonas susceptibles a inundación en el hidrosistema de estudio. Los resultados son analizados en el Capítulo 5.



**Figura 4-27:** Multitemporal de imágenes en la zona de estudio.



**Figura 4-28:** Dinámica fluvial del río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza, zona inundable por geomorfología (elaboración propia).

En la Figura 4-28 se aprecia cómo la inundación presentada en el área de estudio en el período La Niña 2 (2011), superó la franja de inundabilidad máxima establecida a partir del estudio multitemporal de imágenes para el canal principal del río Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza entre los años 1959 - 2011. Sin embargo, las principales afectaciones se presentan por la falta de capacidad hidráulica de canales afluentes al río Magdalena, como el Canal del Dique en la margen occidental, y el canal Tiogollo en la ciénaga San Antonio, como se identifica en la figura. Los análisis finales de las zonas inundables se presentan en el Capítulo 5.

## 4.4 Comentarios finales sobre el Capítulo 4.

Se han implementado a cabalidad las metodologías propuestas en el Capítulo 3, con las cuales se ha intentado dar respuesta a los principales objetivos de esta investigación: primero, los intercambios hídricos entre las ciénagas y el río Magdalena ubicadas entre Calamar y Bocas de Ceniza y segundo, las áreas susceptibles a inundación en esta misma zona. El primer paso, fue establecer la hidrología de la zona de estudio, a través de la implementación del BHLP, dando como resultado los caudales medios anuales para todas las microcuencas, costado izquierdo y costado derecho del río Magdalena, siendo estas últimas (costado oriental), las que mayor escorrentía aportan en comparación con las cuencas del costado occidental en el departamento del Atlántico. Llama la atención que los caudales medios anuales en este último sector son varios órdenes de magnitud más bajos, esto ligado a áreas de microcuencas más pequeñas. Como complemento a la hidrología se implementó un modelo lluvia-escorrentía en la zona, utilizando la herramienta HEC-HMS en período extendido, esta requirió la calibración de los parámetros más sensibles. La calibración se realizó en la cuenca del río Aracataca (departamento del Magdalena), pues fue posible obtener información coincidente de precipitaciones y caudales de salida, encontrando parámetros de referencia como: infiltración máxima, máximo almacenamiento en la superficie, etc. Estos valores fueron extendidos a todas las microcuencas suponiendo comportamientos similares dados los tipos de cobertura vegetal, los suelos y la climatología de la macro región. Los parámetros más sensibles resultaron ser el *Tiempo de retardo* de las cuencas junto con los valores de infiltración en la superficie. Como resultado, se obtuvieron los aportes de caudal de escorrentía a las ciénagas (hidrogramas de entrada) con resolución diaria, coincidente ahora con la resolución de los datos de caudal entrante al hidrosistema y niveles de salida, lo que permitió su inclusión en la modelación matemática en hidráulica para así obtener los resultados de intercambios hídricos en el sector de estudio. Cabe destacar que el período de modelación se seleccionó a partir de la información existente en la condición de frontera aguas abajo (estación Dársena – Barranquilla), la cual reporta información a partir del mes de diciembre del 2007 y por lo tanto se fijó como inicio del período de análisis hidrológico e hidráulico (2008 – 2011), período en el cual se tienen eventos Normales, Niño y Niña, según el índice de variabilidad ONI. Seguidamente, fue posible establecer la principal limitación en la representación rigurosa de la inundación, esto se logró al realizar la comparación de los

resultados de modelación con una imagen reportada en la zona para el mes de diciembre 2011, arrojando resultados satisfactorios, ya que, se logra evidenciar la zona de desborde en la isla Rondón, K18 aproximadamente; sin embargo, la extensión de la mancha sobre la llanura inundable no se representa de forma adecuada por causas asociadas con la limitada calidad de la información topográfica disponible. En este Capítulo también se detallan los resultados del análisis de frecuencias elaborado para las estaciones hidrológicas Calamar e Incora K7, y a partir de las cuales fue posible establecer los caudales máximos entrantes en la zona de estudio para diferentes períodos de retorno y se implementó también una ecuación de regionalización elaborada por el HIMAT con los parámetros de la zona, en aras de conocer los valores máximos de estos caudales esperados en las microcuencas asociadas a las ciénagas; se encontró de la comparación, que los caudales instantáneos esperados en el río Magdalena, como era de esperarse, son varios órdenes de magnitud más grandes a los generados en esta microcuencas por lo que no fueron tenidos en cuenta para establecer el alcance de la franja de inundación asociada a cada período de retorno a través del criterio hidráulico; de otra parte, en este Capítulo, se presenta también el resultado de la franja de inundación con criterio geomorfológico, el cual fue elaborado a partir del análisis multitemporal de imágenes sobre el río Magdalena, permitiendo así establecer la vega de divagación del río entre Calamar y Bocas de Ceniza, esto también se detalló en el Capítulo 2. Además, se implementó la herramienta computacional FLOODDEM (UNALMED) en la zona de estudio; sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios, nuevamente debido a la incertidumbre existente en la información topográfica, que limitó la generación de una adecuada red de drenaje. Insumo indispensable para la adecuada implementación de este modelo geomorfológico, por esta razón, estos resultados no se presentan aquí.

Implementados los modelos matemáticos, los resultados y análisis de volúmenes de intercambios hídricos río Magdalena – ciénagas, así como las zonas susceptibles a inundación asociados a distintos períodos de retorno y criterios geomorfológicos, se presentan y estudian en detalle en el Capítulo 5.

## **5. Intercambios hídricos río Magdalena - ciénagas e identificación de zonas susceptibles a inundación entre Calamar y Bocas de Ceniza**

En este Capítulo se detallan los resultados del análisis de intercambios hídricos entre el río Magdalena y las ciénagas ubicadas en el sector del área regional de estudio (Calamar Bocas de Ceniza). Además, se presentan los resultados de la identificación de áreas susceptibles a inundación en esta misma zona. El Capítulo inicia con la descripción de los resultados de intercambios hídricos, producto de la implementación del mejor modelo hidráulico que fue posible establecer con la información primaria y secundaria disponible, descrita en los Capítulos anteriores. Se presentan adicionalmente los resultados y discusiones sobre los intercambios hídricos bajo los escenarios: año Neutro (normal), año Niño y año Niña para el período modelado (2009 – 2012); cabe anotar que el año 2008 y hasta el mes de abril de 2009 fueron considerados como el período de calentamiento de los modelos matemáticos para disminuir los efectos de las condiciones iniciales impuestas. Posteriormente, se describe y analizan el cauce histórico del río Magdalena y las zonas susceptibles a inundación, para los períodos de retorno de 50 y 100 años, en el área de estudio.

### **5.1 Intercambios hídricos en la zona particular de estudio**

La dinámica general de los flujos en el río Magdalena se resume en la Figura 5-1, donde se aprecia que la respuesta de los intercambios es directamente proporcional al pulso o caudal recibido a la entrada del hidrosistema, principalmente por los caudales del río Magdalena en Calamar, con algunas ciénagas en donde ingresan flujos (valores positivos

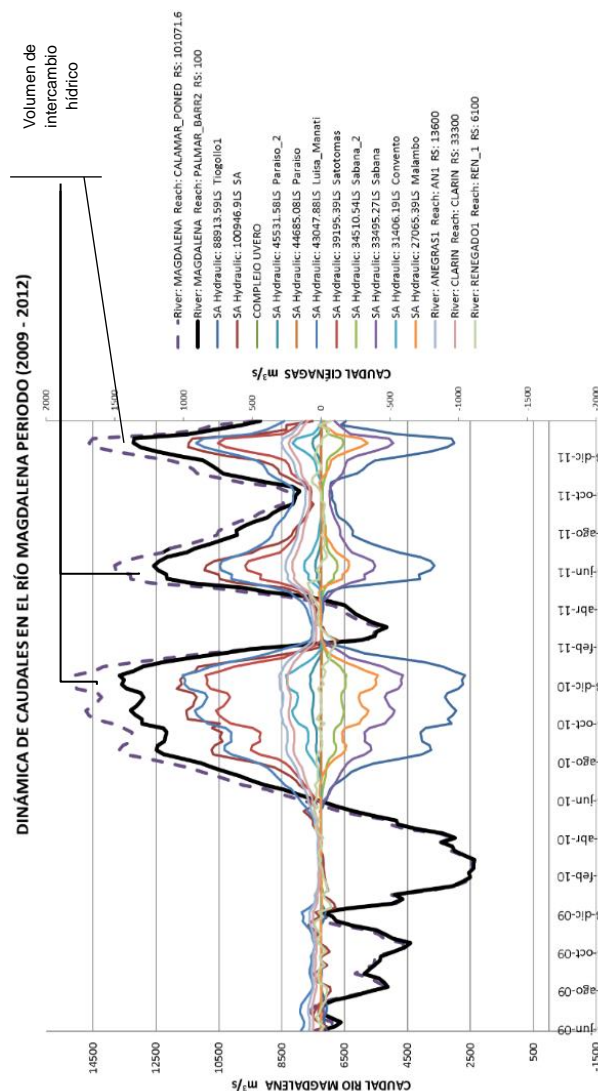
en la Figura 5-1), y otras por el contrario en donde ocurren descargas al río Magdalena (valores negativos). Por ejemplo, en la ciénaga Luisa-Manatí (K50), costado occidental, las mayores ganancias de caudal se presentan entre los meses de septiembre y diciembre de 2010, mientras que la ciénaga San Antonio (K100) y Tiogollo (K90) costado oriental y Malambo (K27) costado occidental, están descargando la mayor cantidad de caudal al río en este mismo período. Este comportamiento cíclico se aprecia también en los períodos mayo – julio de 2011 y diciembre 2011 - enero de 2012; períodos asociados a los caudales máximos en el río Magdalena, coincidentes con el período húmedo La Niña. El comportamiento contrastante de las ciénagas, se debe principalmente a la interconexión entre ellas y en parte a los caudales aportantes de las microcuencas asociadas a cada una de ellas; las ciénagas ubicadas más aguas arriba aumentan primero su nivel y reciben la mayor cantidad de caudal desde el río Magdalena, luego derivan caudal a las ciénagas circundantes a través de los diques naturales que las dividen y caños de interconexión y estas últimas, luego descargan al río Magdalena más aguas abajo, donde se presenta un gradiente hidráulico favorable hacia el río. De otra parte, los menores intercambios son apreciables en el período diciembre 2009 – febrero 2010, período seco El Niño, donde se evidencia una disminución del caudal en el río Magdalena y la desconexión hidráulica del conjunto de ciénagas y caños ubicados alrededor de él, nótese en este período la coincidencia entre el hidrograma de entrada en Calamar (RS 101071), línea punteada color morado y el hidrograma de salida (RS 100), línea negra en la Figura 5-1.

El perfil hidráulico (curva de remanso) presentado en la Figura 5-2, representa el río Magdalena para el mes de diciembre de 2010 (fase Niña), con caudales cercanos a los 15,000 m<sup>3</sup>/s. Las líneas punteadas en la Figura 5-2 representan las márgenes derecha e izquierda del cauce. Nótese que para este mes el perfil de flujo supera en varios casos las márgenes izquierda y derecha del río e incluso los diques ubicados sobre la margen izquierda (costado occidental - departamento del Atlántico), por lo que este período se asocia con aportes de agua del río a las ciénagas e incluso con inundaciones, como se detalla más adelante. En la Figura 5-3, se observan resaltados los diques existentes alrededor del complejo cenagoso del departamento del Atlántico, el terraplén de la vía a Barranquilla actúa como límite. En la visita realizada a la zona, se pudo constatar que

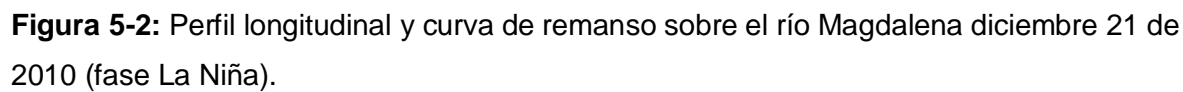


algunas de las estructuras de control existentes (compuertas, culvert, etc.) carecen de mantenimiento y no tienen reglas de operación.

El perfil de flujo de la Figura 5-2 (diciembre de 2010) también se relaciona con la Figura 5-4 en la fase La Niña del ENOS, donde se aprecia como los caudales derivados por los caños Renegado (K54), Aguas Negras (K39) y Clarín (k13), costado oriental, también aumentan significativamente, registrando valores pico de alrededor de 96 m<sup>3</sup>/s, 305 m<sup>3</sup>/s, y 245 m<sup>3</sup>/s, respectivamente; magnitudes que superan el caudal de 30 m<sup>3</sup>/s proyectado para ser derivado por cada caño. (CORPAMAG-DNP-PROCIÉNAGA, 1993).



**Figura 5-1:** Dinámica general de los flujos de agua entre el río Magdalena, las ciénagas circundantes y los caños de interconexión en la zona de estudio.





Vista a la zona de estudio. Diques y estructuras en las ciénagas, El Paraíso, Santo Tomás, Luisa/Manatí. Departamento del Atlántico



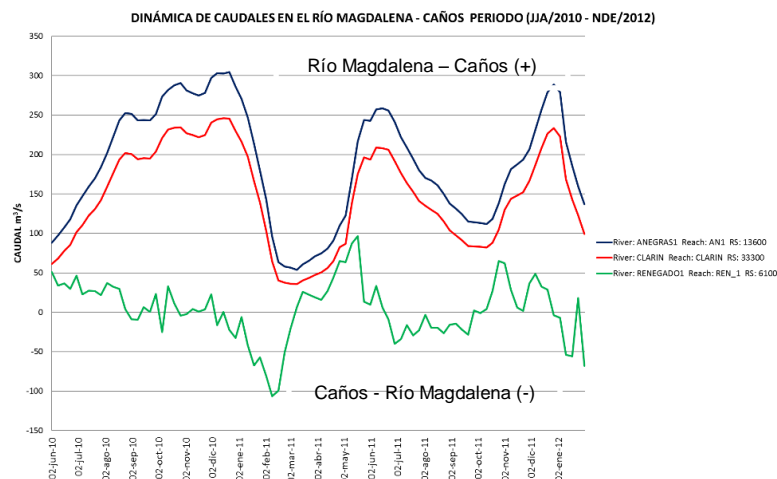
Estructuras de regulación de caudales en la Ciénaga Santo Tomás. Departamento del Atlántico.



Estructuras de regulación de caudales entre la Ciénaga Paraíso – Ciénaga Santo Tomás. Departamento del Atlántico.

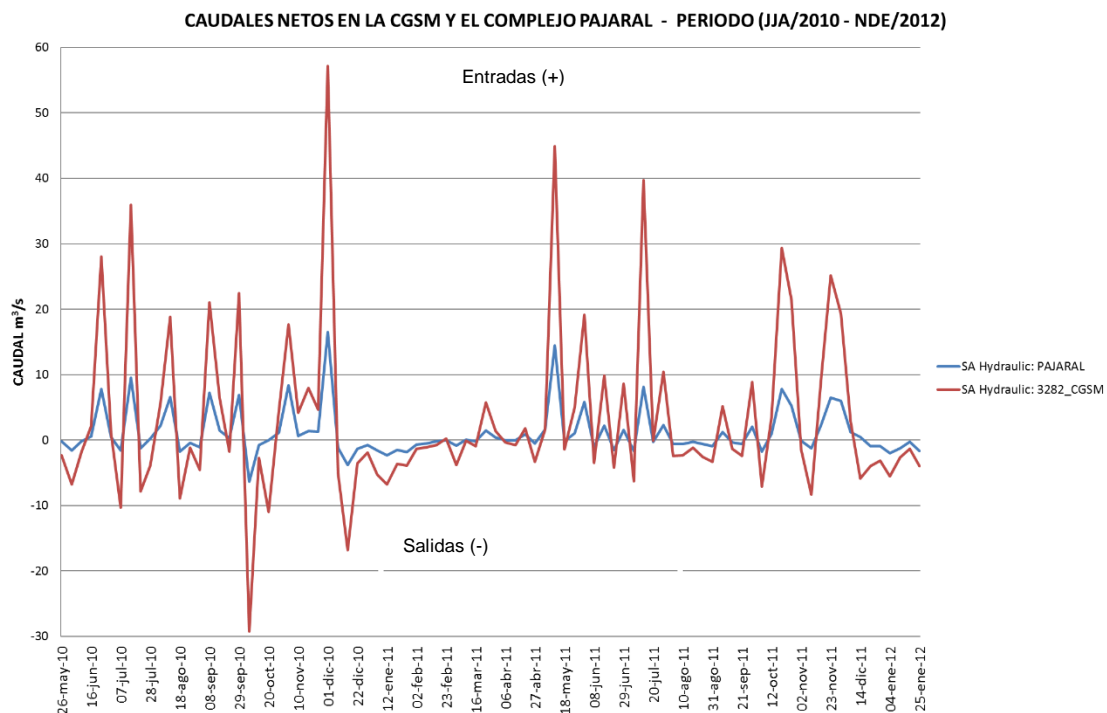
**Figura 5-3:** Visita a la zona de estudio. Diques y estructuras de control alrededor de las ciénagas. Complejo cenagoso del Departamento del Atlántico. Sobre imagen *Google Earth*.

La Figura 5-4 resume el comportamiento de los intercambios hídricos de estos caños y el río Magdalena durante el período junio 2010 – febrero 2012, fase Niña. Nótese que, para los meses de diciembre de 2010 y enero de 2011 se presentan los mayores valores de intercambio de caudal río – ciénagas; estos valores son mayores a los presentados en los períodos junio – julio de 2011 y enero – febrero de 2012, siendo una razón para esto los meses antecedentes. Antes de diciembre de 2010 las ciénagas posiblemente se encontraban con niveles bajos, favoreciendo el flujo de agua desde el río Magdalena por la diferencia entre los gradientes hidráulicos (nivel de agua en el río Magdalena vs nivel de agua en ciénagas), mientras que, para la segunda etapa de lluvias (2011 – 2012), las ciénagas posiblemente contaban con un nivel de agua mayor, disminuyendo la entrada de caudal, llegando incluso a invertir el sentido de flujo. Para el caño Renegado (K54), el cual conecta el río Magdalena con la ciénaga Buenavista, es apreciable cómo se invierte el flujo, en contraste con el comportamiento de los otros caños, en éste, los caudales máximos se presentan un mes antes de los registrados para los otros caños y por ello mientras los caños Clarín y Aguas Negras reciben caudal en dirección a las ciénagas, el caño Renegado descarga desde las ciénagas al río. Lo anterior, asociado con los niveles de las ciénagas y obviamente con la incertidumbre en la topobatimetría extraída del modelo digital de elevación, que reporta alturas hasta de 6.55 m alrededor de estas ciénagas. La incertidumbre en estas alturas, desde luego condiciona las capacidades de almacenamiento de los cuerpos cenagosos y con ello el comportamiento hidráulico del sistema.



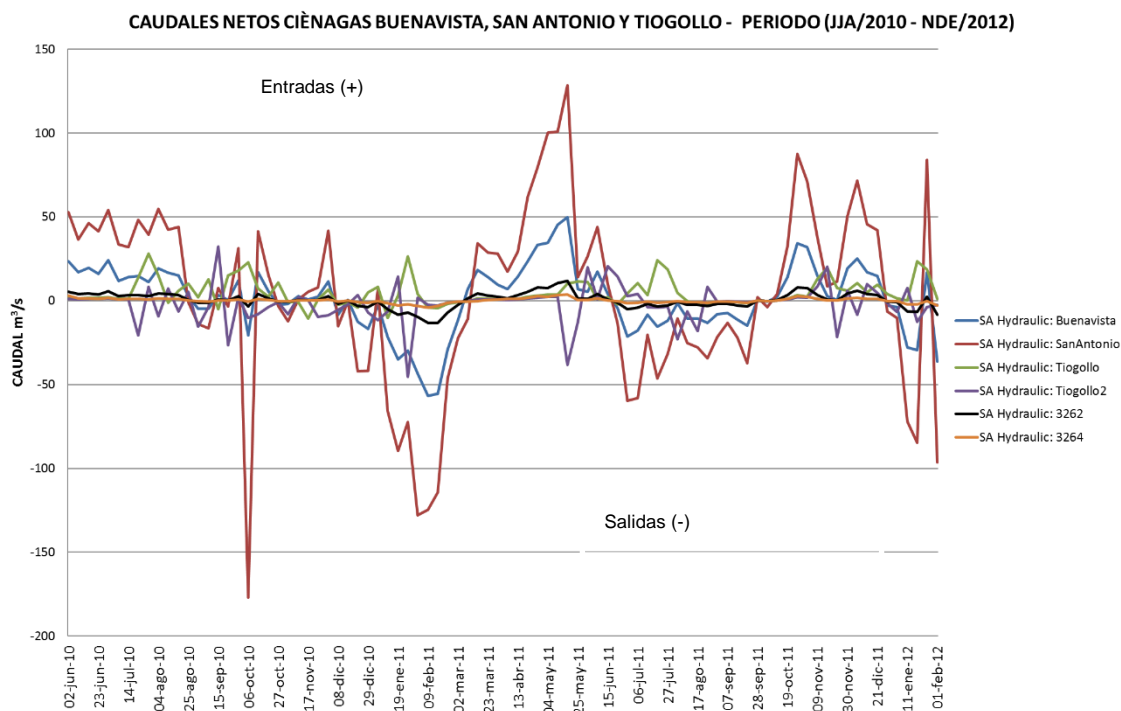
**Figura 5-4:** Dinámica general del flujo entre el río Magdalena y los caños Renegado (K54), Aguas negras (K39) y Clarín (K13) - Escenario fase La Niña del ENOS.

Con relación a las ciénagas, bajo este mismo escenario (fase La Niña), en la CGSM predomina considerablemente la entrada de caudales, es decir, sumatoria de caudales entrantes menos sumatoria de caudales de salida positiva ( $\Delta Q = \sum Q_{entrada} - \sum Q_{salida}$ ), destacándose el mes de diciembre de 2010, acorde con lo expresado anteriormente; algo similar ocurre en el complejo cenagoso Pajalar como se aprecia en la Figura 5-5. Cabe anotar que el complejo Pajalar es alimentado desde el río Magdalena por el caño Aguas Negras al oriente y se conecta con la CGSM al occidente, mientras que el caño Clarín llega a la CGSM por el costado nororiental. La CGSM a su vez se conecta con el Mar Caribe al norte y también con el complejo Pajalar al occidente, además de contar con los aportes reportados de la escorrentía superficial y los caudales de los ríos Aracataca y Fundación procedentes de la SNSM. Estos balances son extraídos directamente de la herramienta HEC-RAS para cada cuerpo de agua y/o estructura de derivación de caudal (vertedero lateral).



**Figura 5-5:** Caudales netos ( $\Delta Q = \sum Q_{entrada} - \sum Q_{salida}$ ) en la CGSM y el complejo cenagoso Pajalar - Escenario fase La Niña del ENOS.

Para la ciénaga Buenavista, que recibe los aportes del río Magdalena a través del caño Renegado el comportamiento es más cíclico, como se aprecia en la Figura 5-6, donde trimestralmente el caudal cambia de sentido río-ciénaga a ciénaga-río. Los caudales netos máximos entrantes a la ciénaga se presentan en el mes de mayo de 2011 ( $49.98 \text{ m}^3/\text{s}$ ), mientras que las salidas máximas son cercanas a los  $57 \text{ m}^3/\text{s}$  (febrero de 2011). La ciénaga San Antonio (K100), ubicada también al costado oriental del área de estudio, pero más aguas arriba, tiene un comportamiento similar al descrito para la ciénaga Buenavista, siendo la que presenta mayores picos de caudales de intercambio, con salidas de alrededor de  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  (octubre 2010) y máximos entrantes de  $138 \text{ m}^3/\text{s}$  (junio 2011), ver Figura 5-6, donde también se representan otras ciénagas del costado oriental del área de estudio.

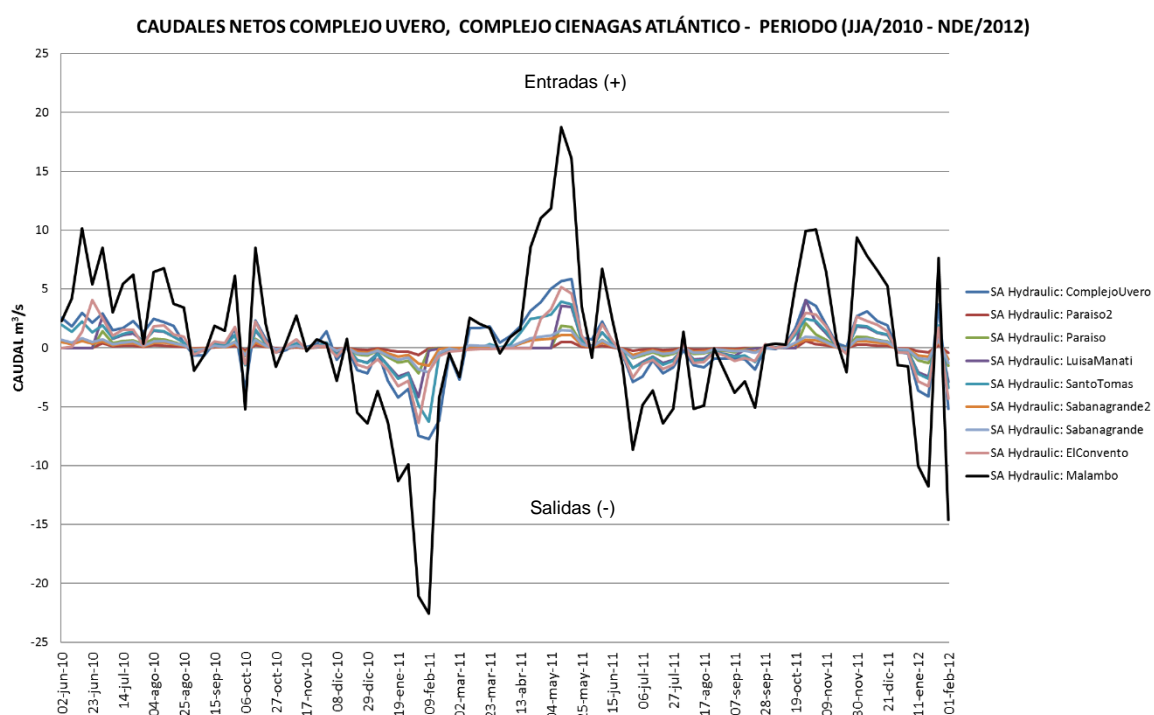


**Figura 5-6:** Caudales netos de intercambio en las ciénagas Buenavista, Tiogollo, San Antonio - Escenario fase La Niña del ENOS.

Hacia el costado occidental (departamento del Atlántico), la mayor ciénaga receptora de caudales provenientes del río Magdalena es la ciénaga Malambo (K20), y Sabanagrande Paraíso 2 (K32), con caudales máximos de alrededor de  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente, en mayo de 2011; el comportamiento es muy cíclico en todas estas ciénagas. La razón



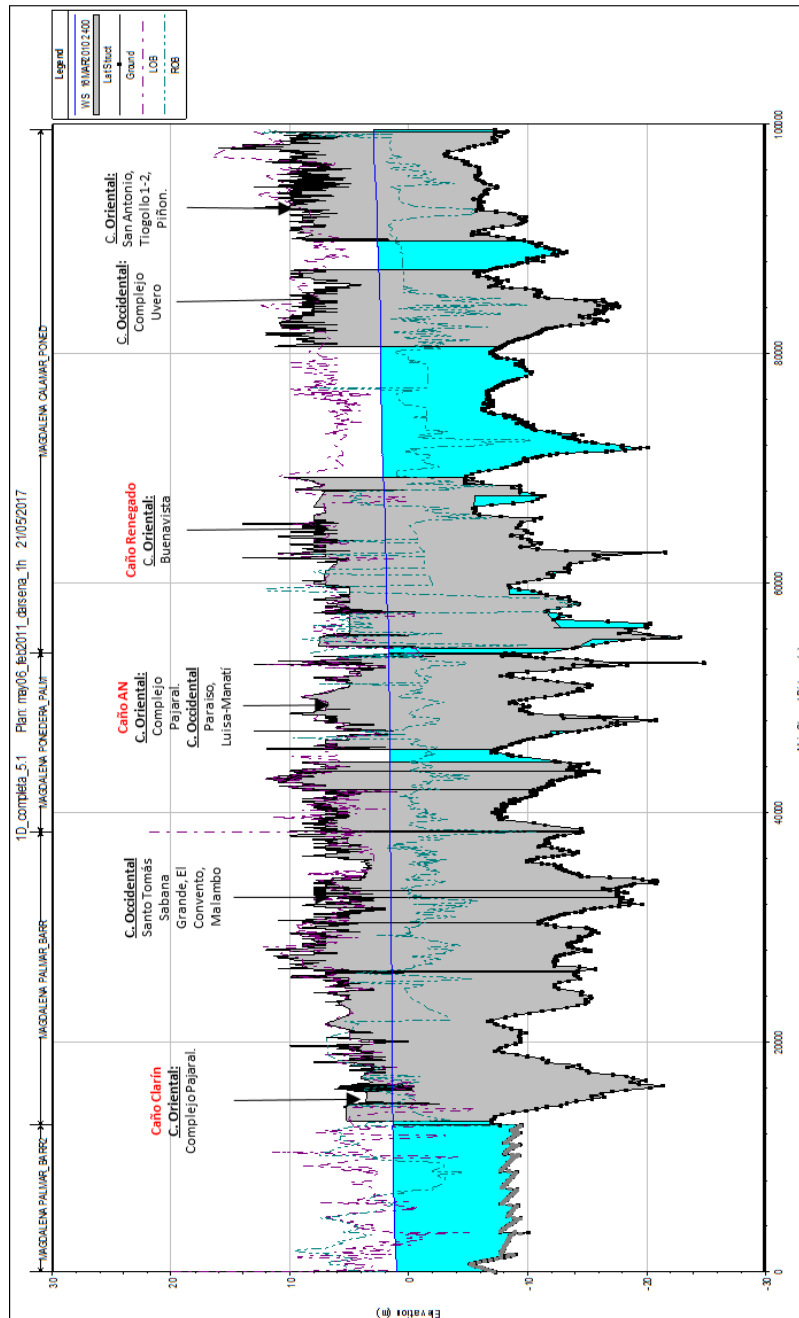
para estos contrastes de caudal se asocia con las interconexiones existentes entre las ciénagas, ver Figura 5-7. Nótese también en esta figura, que algunas ciénagas de este costado generan muy poco aporte de caudal y/o recepción del mismo, reciben el caudal, lo transitan y transportan a las ciénagas vecinas o nuevamente al río Magdalena a través de las estructuras de conexión con el río Magdalena y entre ciénagas, lo cual, también regula la entrada de caudales a las mismas. En el anexo 2, se presentan los intercambios hídricos de caudales para los días 21 de diciembre de 2010 (máximo perfil de flujo en La Niña 1) y 28 de diciembre de 2011 (máximo perfil de flujo en La Niña 2).



**Figura 5-7:** Caudales netos en las ciénagas costado occidental del río Magdalena - Escenario fase La Niña del ENOS.

De otra parte, los resultados del modelo hidráulico para la fase El Niño del ENOS, se resumen en el perfil de flujo o curva de remanso presentado en la Figura 5-8, el cual detalla el comportamiento del río Magdalena en época de caudales bajos. En comparación con la Figura 5-2, es claro que el nivel de la lámina de agua no supera los diques artificiales, principalmente sobre la margen izquierda (Atlántico) y en algunos casos los albardones o diques naturales de la margen derecha de la zona de estudio, con lo cual se configura un

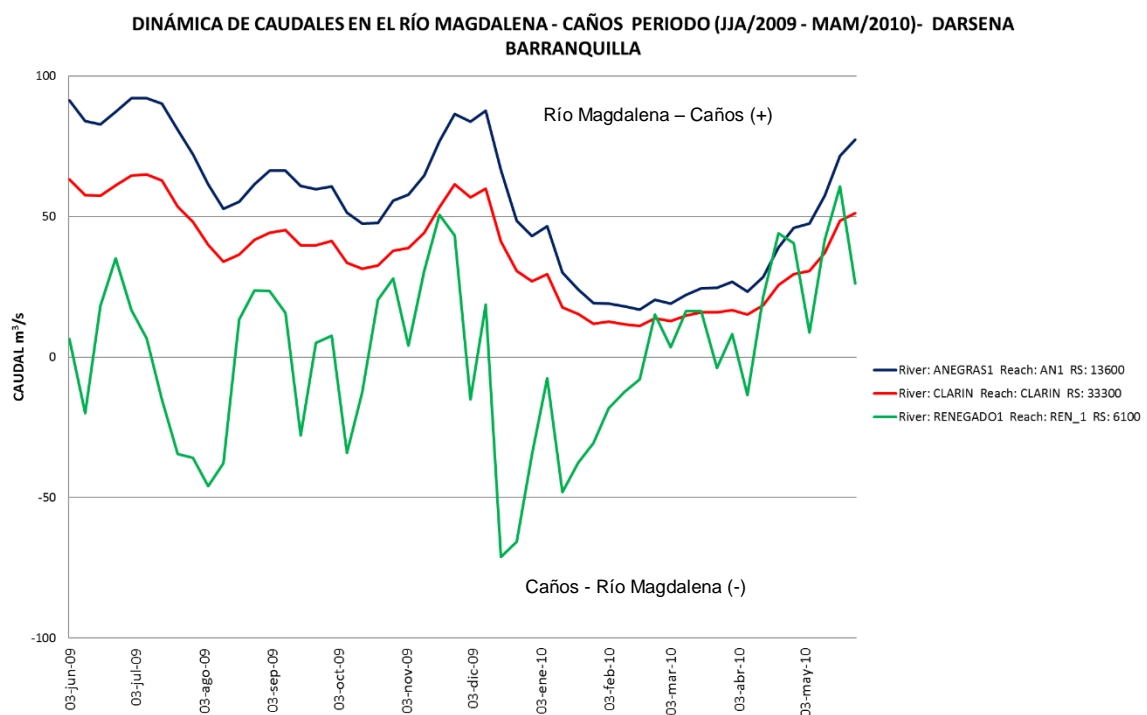
sistema desconectado en algunos sitios. El período de análisis para esta fase se presenta entre los trimestres de JJA de 2009 y MAM de 2010, mientras que en el anexo 2 se detalla el intercambio hídrico en tiempo seco, tomando como referencia el día 16 de febrero de 2010, la misma fecha de la imagen del perfil o curva de remanso presentada en la Figura 5-8.



**Figura 5-8:** Perfil longitudinal sobre el río Magdalena febrero 16 de 2010 (Fase El Niño).

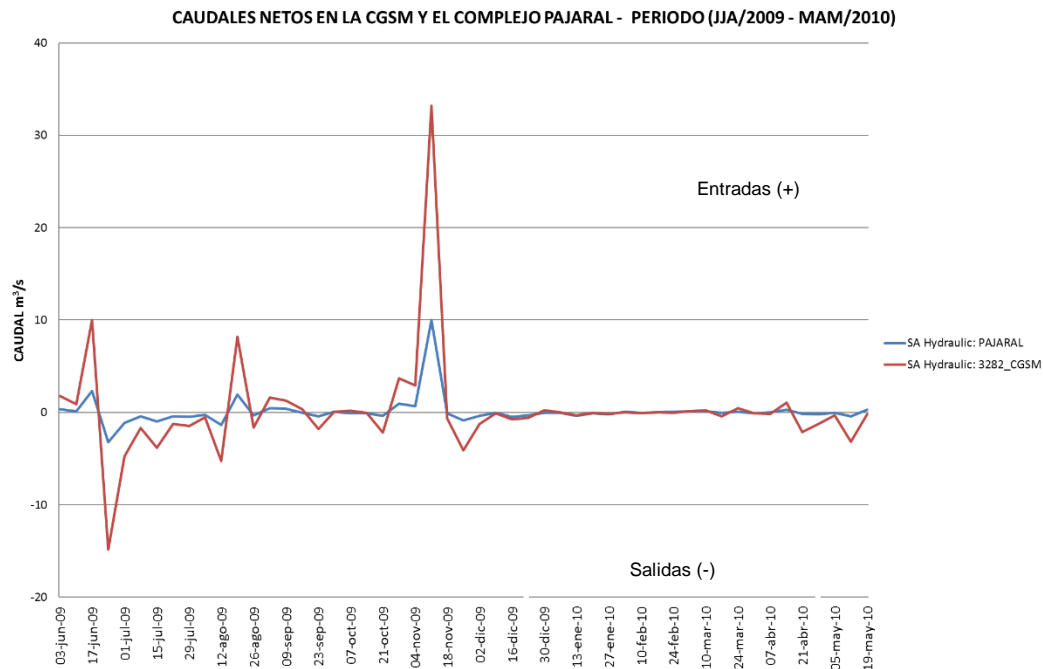


La Figura 5-9 presenta los caudales derivados del río Magdalena a través de los caños Renegado (K54), Aguas Negras (K39) y Clarín (K13) durante este período influenciado por la Fase Niño del ENOS. El caño Renegado tiene un comportamiento cíclico del caudal, primero en dirección hacia la ciénaga Buenavista, con un máximo alrededor de 50 m<sup>3</sup>/s y posteriormente, se invierte el flujo, esta vez en dirección ciénaga – río Magdalena con un valor máximo de alrededor de 70 m<sup>3</sup>/s; el Caño Aguas Negras en este período muestra un máximo de 92 m<sup>3</sup>/s en dirección hacia las ciénagas y zonas circundantes; mientras que, por el caño Clarín se deriva hacia la CGSM un caudal máximo de 65 m<sup>3</sup>/s. Caudales notablemente menores a los máximos reportados en la fase La Niña, previamente analizada.



**Figura 5-9:** Dinámica general del flujo entre el río Magdalena y los caños Renegado (K54), Aguas negras (K39) y Clarín (K13) - Escenario fase El Niño del ENOS.

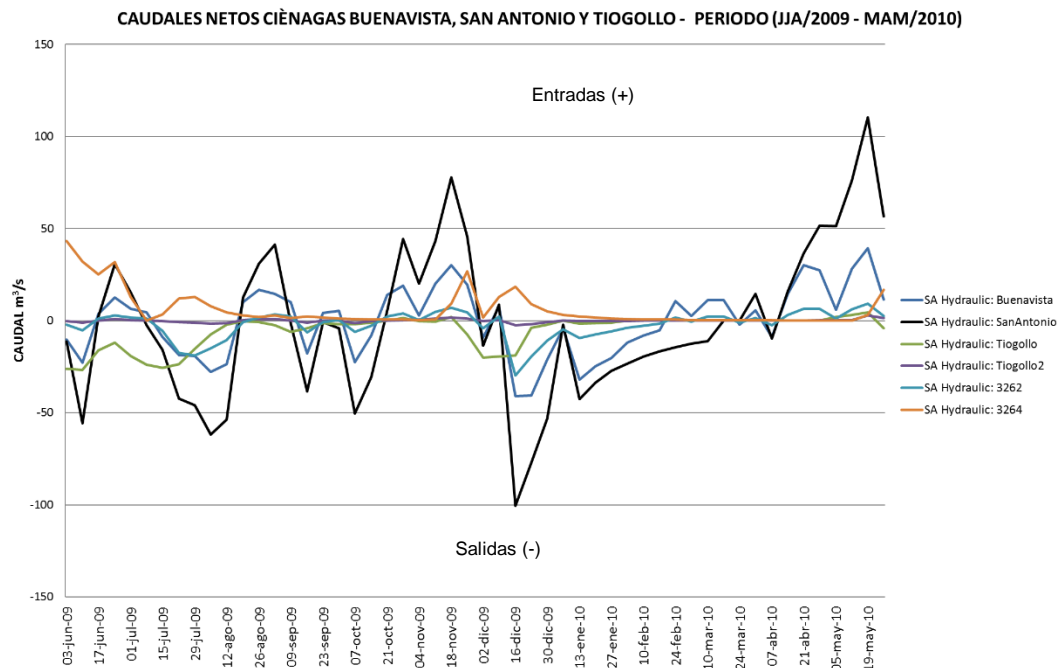
En el caso de las ciénagas principales del costado oriental (departamento del Magdalena), el complejo Pajara y CGSM, el caudal neto ( $\Delta Q = \sum Q_{\text{entrada}} - \sum Q_{\text{salida}}$ ), presenta un pico máximo de caudal entrante de 8 m<sup>3</sup>/s y 32 m<sup>3</sup>/s, respectivamente; mientras que la mayor salida de caudal neto es de 3 m<sup>3</sup>/s y 15 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. (ver Figura 5-10).



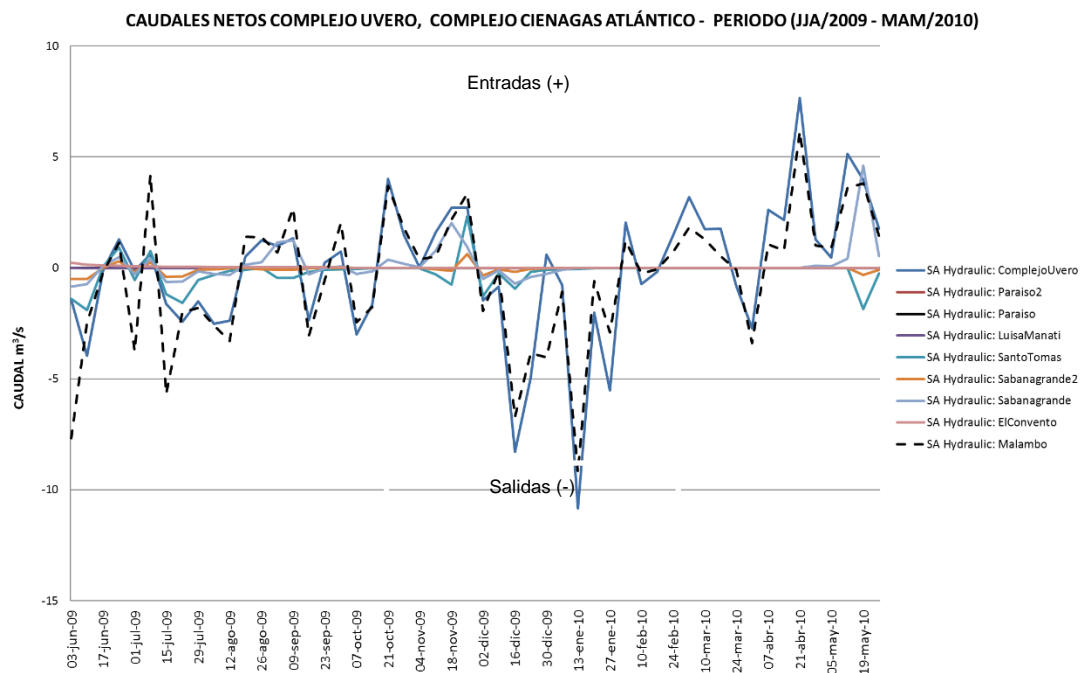
**Figura 5-10:** Caudales netos en la CGSM y el complejo cenagoso Pajaral - Escenario fase El Niño del ENOS.

Para el resto de las ciénagas representativas del costado oriental su funcionamiento se resume en la Figura 5-11 donde se destacan la ciénaga Buenavista (K54), con un caudal neto entrante máximo de 30 m<sup>3</sup>/s y un valor máximo saliente de 40 m<sup>3</sup>/s y la ciénaga San Antonio (K100) con caudales entrantes aproximados de 110 m<sup>3</sup>/s y salidas netas máximas de 100m<sup>3</sup>/s.

En la Figura 5-12, se presentan los caudales netos de intercambio de las ciénagas del costado occidental del río Magdalena, subrayando que son menores en términos generales a las magnitudes de caudales netos que ocurren en las ciénagas del costado oriental. En este sector se destacan las magnitudes de los caudales en las ciénagas Malambo y el complejo cenagoso el Uvero, ubicadas respectivamente en los extremos aguas arriba y aguas abajo de este costado; nótese que las magnitudes de caudal máximo entrante no superan los 8 m<sup>3</sup>/s, mientras que los caudales máximos de salida no superan los 12 m<sup>3</sup>/s, también, bastante menores a los caudales reportados para la fase La Niña (ENOS).



**Figura 5-11:** Caudales netos en las ciénagas Buenavista, Tiogollo, San Antonio - Escenario fase El Niño del ENOS.



**Figura 5-12:** Caudales netos en las ciénagas costado occidental del río Magdalena - Escenario fase El Niño del ENOS.

En la Tabla 5-1, se resumen los volúmenes de intercambio para las ciénagas de la zona de estudio, en las fases año neutro, El Niño (2009-2010) y La Niña (2010-2012) del ENOS para el período modelado hidráulicamente. En color azul los volúmenes hacia las ciénagas o ganancia de caudales y en color rojo los volúmenes salientes de la mismas o pérdida de caudales. Nótese que para el período año neutro y El Niño, junio (2009) – mayo (2010), se presenta una disminución de los caudales entrantes a las ciénagas en comparación con los períodos La Niña. En total en este período sale de las ciénagas un volumen aproximado de 12 Mm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos). De otra parte, para los períodos La Niña, años 2010 – 2011 (Niña 1) y años 2011 – 2012 (Niña 2), es apreciable que los volúmenes de entrada en la mayoría de ciénagas aumentan, se encuentran estas directamente conectadas o no con el río Magdalena, mostrando mayores valores de intercambio en el primer período (La Niña 1), junio (2010) – Mayo (2011), con 627 Mm<sup>3</sup>, este volumen llena las ciénagas, ya que estas se encuentran precedidas del tiempo seco (El Niño); para el segundo período (La Niña 2), junio (2011) – febrero (2012), la magnitud de los intercambios disminuye en comparación con el período inmediatamente anterior, debido a que las ciénagas se encontrarían llenas por el período La Niña 1. Sin embargo, siguen prevaleciendo los flujos aportantes hacia estas, con un volumen neto total aproximado de 184 Mm<sup>3</sup>. Como es apreciable también en la Tabla 5-1, los mayores cuerpos receptores de volúmenes de agua son las ciénagas San Antonio (K100), Buenavista (K54), complejo Pajaral (K39) y la CGSM, en el costado oriental; también llama la atención en este costado los volúmenes entrantes a las ciénagas El Piñón y Tiogollo, los cuales se deben a que estas reciben los aportes de la ciénaga San Antonio. En la margen izquierda (departamento del Atlántico) el mayor receptor de caudales es la ciénaga Malambo ubicada aguas abajo (K20), la cual está conectada totalmente con río Magdalena, además, se conecta con la ciénaga El Convento, que es la segunda mayor receptora de caudales en este costado. En todo el sistema analizado, también llama la atención, que debido a la topografía la ciénaga identificada como 3255, perteneciente al complejo cenagoso Pajaral (departamento del Magdalena), queda completamente desconectada, sin recepción ni aporte de agua.

**Tabla 5-1:** Resumen volúmenes de intercambio en las 31 ciénagas del área de estudio. En color rojo los volúmenes de salida de las ciénagas y viceversa en color azul.

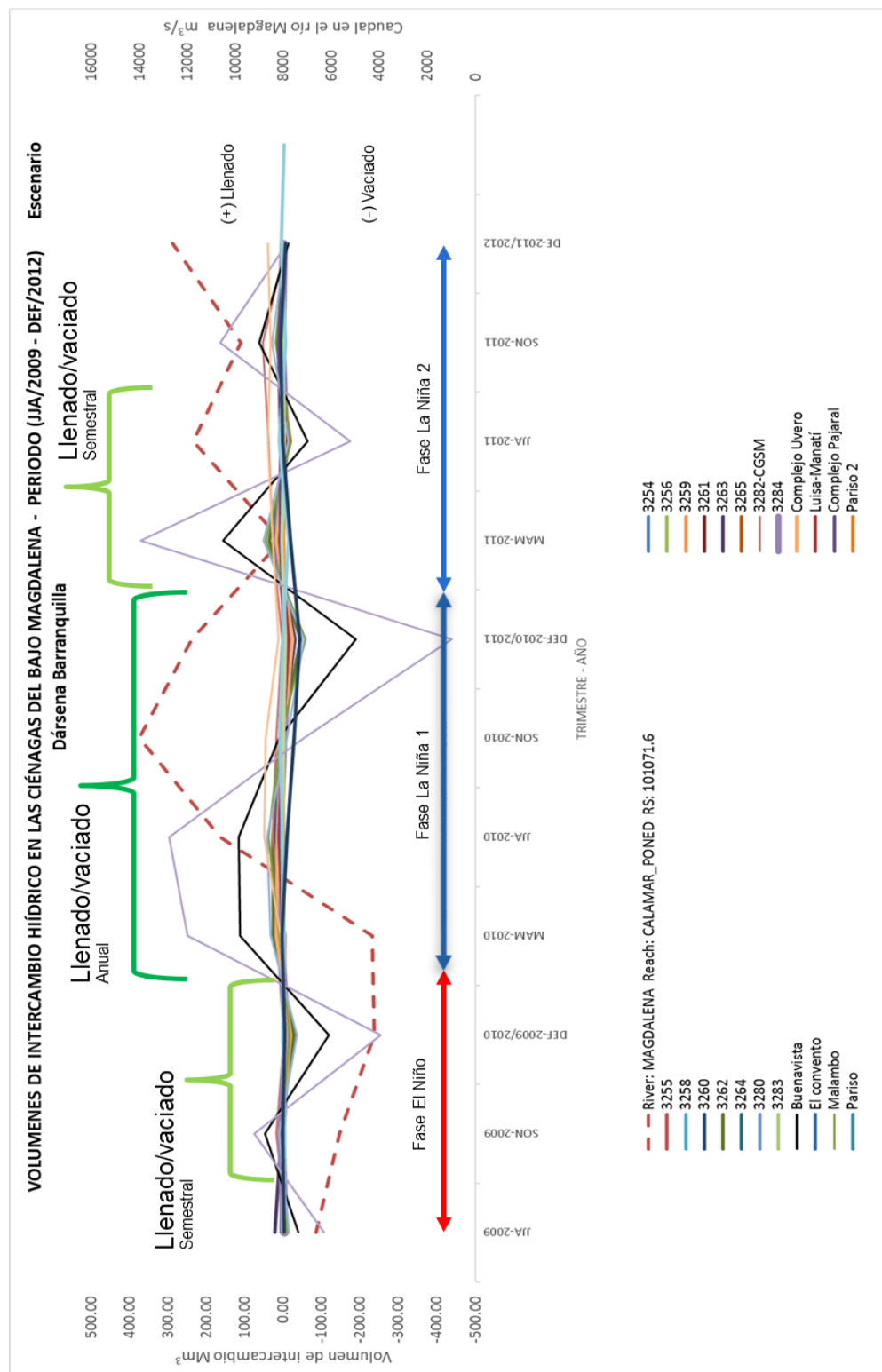
ID CIÉNAGAS	Abscisado Río Magdalena	Margen o Departamento	2009-2010	2010-2011	2011 - 2012	TOTALES
			Neutro/ EL NIÑO Mm <sup>3</sup>	LA NIÑA 1 Mm <sup>3</sup>	LA NIÑA 2 Mm <sup>3</sup>	Mm <sup>3</sup>
3254		Derecha / Magdalena	0.045	1.557	1.506	3
3255		Derecha / Magdalena	0.000	0.000	0.000	0
3256		Derecha / Magdalena	0.432	2.867	1.394	5
3257		Derecha / Magdalena	0.088	2.573	2.477	5
3258		Derecha / Magdalena	0.067	0.423	0.203	1
3259		Derecha / Magdalena	0.015	4.696	-0.823	4
3260		Derecha / Magdalena	6.420	6.423	-1.191	12
3261		Derecha / Magdalena	0.118	16.420	-3.405	13
3262		Derecha / Magdalena	1.037	23.022	-3.662	20
3263		Derecha / Magdalena	26.366	20.560	-4.173	43
3264		Derecha / Magdalena	0.085	8.470	-1.415	7
3265		Derecha / Magdalena	0.009	4.569	-0.901	4
3280		Derecha / Magdalena	0.408	4.212	-1.028	4
<b>3282-CGSM</b>	<b>K 13</b>	<b>Derecha / Magdalena</b>	<b>3.837</b>	<b>79.241</b>	<b>84.980</b>	<b>168</b>
3283		Derecha / Magdalena	0.018	0.293	-0.200	0
3284		Derecha / Magdalena	0.390	8.373	-1.134	8
<b>Buenavista</b>	<b>K 54</b>	<b>Derecha / Magdalena</b>	<b>3.335</b>	<b>96.977</b>	<b>-11.957</b>	<b>88</b>
<b>Complejo Uvero</b>	<b>K 71</b>	<b>Izquierda / Atlántico</b>	<b>-3.998</b>	<b>11.836</b>	<b>-1.234</b>	<b>7</b>
<b>El convento</b>	<b>K 29</b>	<b>Izquierda / Atlántico</b>	<b>-0.680</b>	<b>9.550</b>	<b>-1.264</b>	<b>8</b>
Luisa-Manatí	K 40	Izquierda / Atlántico	-0.003	3.995	0.166	4
<b>Malambo</b>	<b>K 20</b>	<b>Izquierda / Atlántico</b>	<b>-9.435</b>	<b>36.757</b>	<b>-5.147</b>	<b>22</b>
<b>Complejo Pajara</b>	<b>K 39</b>	<b>Derecha / Magdalena</b>	<b>0.569</b>	<b>19.205</b>	<b>18.716</b>	<b>38</b>
Pariso	K 44	Izquierda / Atlántico	0.000	2.090	0.048	2
Pariso 2	K 45	Izquierda / Atlántico	0.000	0.575	0.009	1
<b>El Piñon</b>	<b>K 71</b>	<b>Derecha / Magdalena</b>	<b>-4.303</b>	<b>30.446</b>	<b>12.135</b>	<b>38</b>
Sabanagrande	K 32	Izquierda / Atlántico	-0.838	3.396	-0.324	2
Sabanagrande 2	K 34	Izquierda / Atlántico	-0.263	2.534	-0.296	2
<b>San Antonio</b>	<b>K 100</b>	<b>Derecha / Magdalena</b>	<b>-32.169</b>	<b>177.775</b>	<b>-18.059</b>	<b>128</b>
<b>Santo Tomás</b>	<b>K 37</b>	<b>Izquierda / Atlántico</b>	<b>-0.738</b>	<b>8.685</b>	<b>-1.185</b>	<b>7</b>
Tiogollo	K 89	Izquierda / Atlántico	-1.678	137.565	116.076	252
<b>Tiogollo 2</b>	<b>K 89</b>	<b>Izquierda / Atlántico</b>	<b>-0.692</b>	<b>-97.787</b>	<b>3.934</b>	<b>-95</b>
			-12	627	184	800

El comportamiento trimestral de los intercambios hídricos de volúmenes de agua entre las ciénagas, caños, el río Magdalena y todos los aportantes principales, destacados anteriormente, se muestra en la Figura 5-13 y se detalla en la Tabla 5-2. Nótese el claro comportamiento cíclico de estos intercambios, dominados por la dinámica del río Magdalena en Calamar, como ha sido discutido con anterioridad en este Capítulo. Los mayores volúmenes de intercambio se presentan hacia las ciénagas San Antonio y la ciénaga Buenavista, ambas directamente conectadas al río Magdalena. Las dinámicas de llenado y vaciado son acordes con la duración del hidrograma de entrega en el río Magdalena, por ejemplo, anuales, en la primera temporada de lluvias (La Niña 1), período DEF (2010) - DEF (2011); y semestrales para la segunda temporada (La Niña 2), primero

entre el período DEF 2011 – JJA 2011, y posteriormente el período JJA 2011 – DEF 2012. Las ciénagas del costado occidental presentan una dinámica de intercambios hídricos similar a los descritos para el costado oriental, pero con menores magnitudes.

En todo el macrosistema se destaca al final del período de modelación que las ciénagas presentan un superávit o recepción de agua fresca desde el río Magdalena. Lo anterior, construye una evidencia de lo importante y significativo de las conexiones naturales entre el río Magdalena y las ciénagas circundantes, con comportamiento multianual, las cuales se deben preservar. Mientras que, los caudales de agua derivados a través de los caños Renegado, Aguas Negras y Clarín, conducen desde el río Magdalena importantes volúmenes de agua que tienen como receptor final la CGSM. Estos volúmenes de agua garantizan el adecuado funcionamiento del sistema CGSM, como ha sido detallado también por (Díaz-Granados, Camacho, et al., 1996) y (Múnera, Vélez, et al., 2003a), requiriendo mantenimiento y adecuada información sobre las condiciones actuales de los mismos. La Figura 5-14, es un infograma resumen de los resultados de intercambio hídrico más representativos del Bajo Magdalena entre Calamar y Bocas de Ceniza.

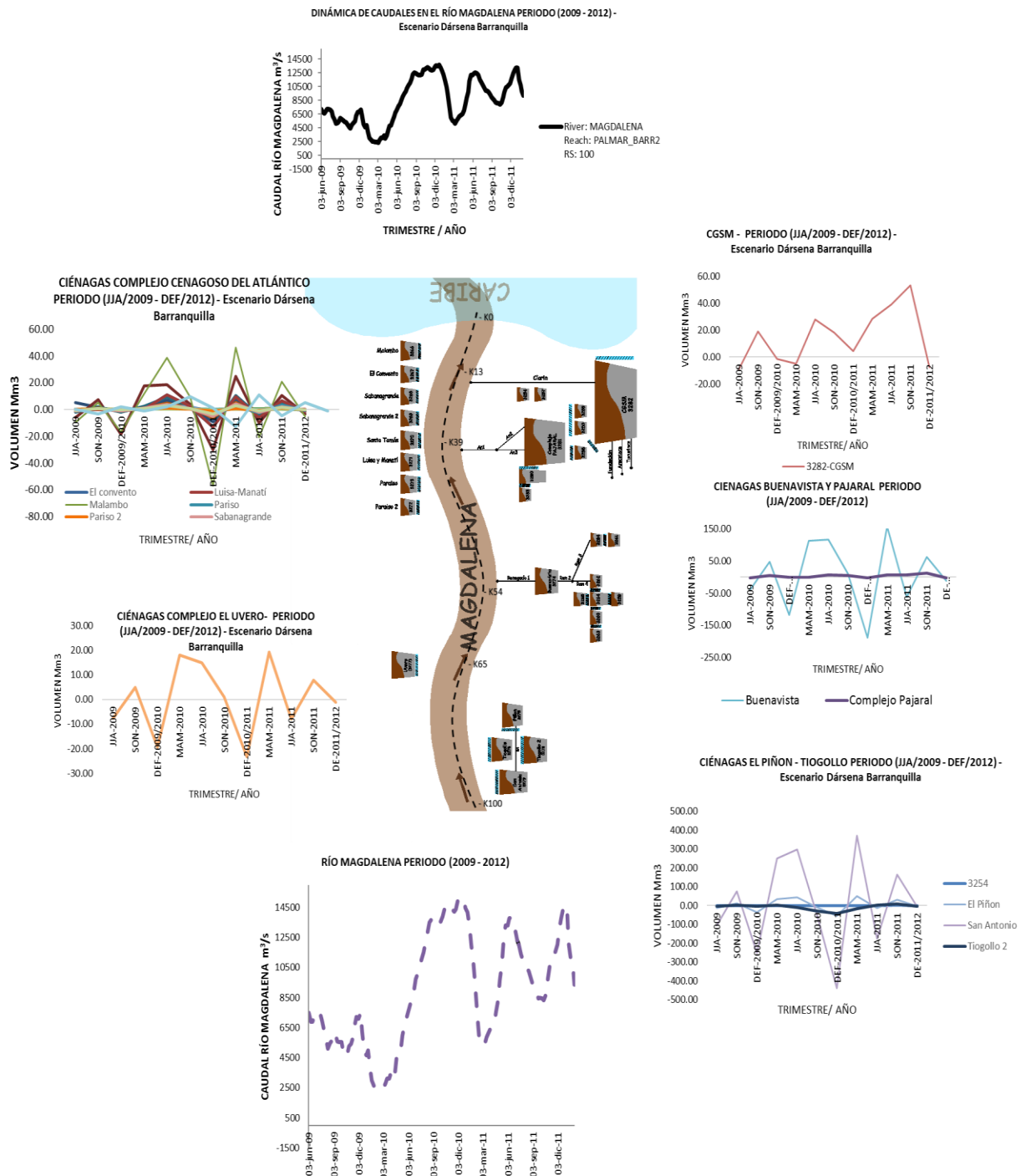
En el anexo 2, elaborado como aporte al entendimiento de los intercambios hídricos analizados, y comentado en apartados anteriores de este Capítulo, se presenta un detalle de la distribución de caudales en el período de análisis, representando una fecha Niño, Niña 1 y Niña 2. Para el día 16 de febrero de 2010, asociado con tiempo seco, los flujos de caudal desde el río Magdalena hacia las ciénagas son nulos, con lo cual se configura un sistema desconectado hidráulicamente; el caudal entrante en Calamar es de  $2,408 \text{ m}^3/\text{s}$ , después de derivado el caudal del Canal del Dique. En contraste, para el día 21 de diciembre de 2011, La Niña 1, los flujos de caudal dan cuenta de una retención en el sistema cercana al 10% del caudal entrante, de los cuales, el 7% se presenta hacia el costado del Departamento del Atlántico, mientras que el 3% restante es hacia el Departamento del Magdalena, siendo la CGSM la mayor receptora de estos. Un comportamiento similar se aprecia en el día 28 de diciembre de 2011, La Niña 2, donde se presenta un porcentaje similar en la regulación del caudal saliente hacia Barranquilla (10%), distribuidos de la misma manera. La magnitud de los caudales entrantes fueron  $15,085 \text{ m}^3/\text{s}$  (La Niña 1) y  $14,627 \text{ m}^3/\text{s}$  (La Niña 2).



**Figura 5-13:** Volúmenes de intercambio hídrico en las ciénagas del Bajo Magdalena período JJA/2009 – DEF/2012.

VOLUMEN / TRIMESTRAL	ID CIÉNAGAS	Márgen / Departamento	NEUTRO / EL NIÑO (2009-2010)			LA NIÑA 1 (2010 - 2011)			LA NIÑA 2 (2011 - 2012)			TOTALES			
			SON-2009	DEF-2009/2010	MAM-2010	JJA-2010	SON-2010	DEF-2010/2011	MAM-2011	JJA-2011	SON-2011		DEF-2011/2012		
			Mm³	Mm³	Mm³	Mm³	Mm³	Mm³	Mm³	Mm³	Mm³		Mm³		
			-0.19	0.36	-0.08	-0.05	0.61	0.45	-0.12	0.61	0.62	1.06	-0.17	3.11	
	3254	Derecha / Magdalena	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	3255	Derecha / Magdalena	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	3256	Derecha / Magdalena	-0.06	0.52	-0.05	0.02	1.40	0.74	0.05	0.68	0.58	1.09	-0.28	4.69	
	3257	Derecha / Magdalena	-0.31	0.60	-0.12	-0.09	1.02	0.73	-0.18	1.00	1.03	1.72	-0.27	5.14	
	3258	Derecha / Magdalena	-0.01	0.09	-0.02	0.00	0.21	0.09	-0.01	0.13	0.07	0.18	-0.05	0.69	
	3259	Derecha / Magdalena	-1.11	1.00	-1.16	1.29	4.91	0.92	-6.72	5.59	-2.46	2.59	-0.95	3.89	
	3260	Derecha / Magdalena	4.96	1.55	-1.56	1.47	6.81	1.25	-9.37	7.74	-3.52	3.62	-1.29	11.65	
	3261	Derecha / Magdalena	-6.26	7.16	-18.54	17.75	18.34	3.82	-30.29	24.55	-10.33	10.35	-3.42	13.13	
	3262	Derecha / Magdalena	-8.86	11.54	-27.13	25.49	26.94	3.33	-43.86	36.62	-14.54	14.57	-3.69	20.40	
	3263	Derecha / Magdalena	21.63	4.90	-4.69	4.52	21.23	4.50	-29.21	24.04	-11.05	11.28	-4.40	42.75	
	3264	Derecha / Magdalena	-2.11	1.91	-2.19	2.47	9.21	1.37	-12.63	10.51	-4.63	4.84	-1.62	7.14	
	3265	Derecha / Magdalena	-1.06	0.93	-1.07	1.21	4.54	1.00	-6.18	5.21	-2.41	2.43	-0.92	3.68	
	3280	Derecha / Magdalena	-0.27	0.82	-0.34	0.20	2.36	2.02	-1.70	1.54	-0.88	0.79	-0.94	3.59	
	3282-CGSM	Derecha / Magdalena	-9.03	19.29	-1.40	-5.02	28.12	18.35	4.49	28.28	39.34	53.49	-7.85	168.06	
	3283	Derecha / Magdalena	-0.02	0.05	-0.03	0.02	0.19	0.17	-0.22	0.15	-0.12	0.03	-0.11	0.11	
	3284	Derecha / Magdalena	-3.25	4.17	-9.14	8.62	9.86	1.10	-16.02	13.43	-5.28	5.33	-1.18	7.63	
	Buenavista	Derecha / Magdalena	-39.66	47.67	-117.63	112.95	116.27	11.27	-187.99	157.43	-62.16	62.37	-12.17	88.36	
	Complejo Uvero	Izquierda / Atlántico	-7.74	5.00	-19.40	18.14	10.78	1.02	-23.27	19.26	-8.01	7.86	-1.09	6.60	
	El convento	Izquierda / Atlántico	-0.51	-0.11	-0.07	0.00	10.78	2.54	-13.29	9.52	-5.96	6.39	-1.69	7.61	
	Luisa-Manatí	Izquierda / Atlántico	0.00	0.00	0.00	0.00	6.24	1.33	-8.19	4.61	-4.60	5.80	-1.04	4.16	
	Malambo	Izquierda / Atlántico	-9.76	5.19	-16.61	11.75	38.59	9.25	-57.28	46.19	-20.74	20.90	-5.32	22.17	
	Complejo Pajalal	Derecha / Magdalena	-2.41	4.51	-0.97	-0.56	7.70	5.42	-1.58	7.67	7.65	13.09	-2.02	38.49	
	Pariso	Izquierda / Atlántico	0.00	0.00	0.00	0.00	3.28	0.68	-4.29	2.42	-2.46	3.06	-0.55	2.14	
	Pariso 2	Izquierda / Atlántico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.20	-1.16	0.65	-0.68	0.85	-0.16	0.58	
	El Piñon	Derecha / Magdalena	-13.87	10.38	-34.88	34.07	42.21	-9.48	-53.63	51.35	-13.04	29.96	-4.78	38.28	
	Sabanagrande	Izquierda / Atlántico	-1.29	0.70	-1.12	0.86	3.20	0.62	-5.07	4.24	-1.90	1.87	-0.30	2.23	
	Sabanagrande 2	Izquierda / Atlántico	-0.84	0.44	-0.29	0.42	2.67	0.45	-3.56	2.97	-1.39	1.37	-0.28	1.97	
	Santa Antonio	Derecha / Magdalena	-105.38	75.80	-252.54	249.95	297.25	-53.19	-437.90	371.62	-174.25	164.62	-8.42	127.55	
	Santo Tomás	Izquierda / Atlántico	-3.24	1.95	-1.38	1.93	9.56	1.26	-12.96	10.83	-4.94	4.88	-1.13	6.76	
	Tigolillo	Izquierda / Atlántico	-3.97	2.71	-8.11	7.69	50.64	46.73	12.93	27.27	40.52	34.07	41.50	251.96	
	Tigolillo 2	Izquierda / Atlántico	-2.43	1.57	-3.27	3.43	-9.92	-27.80	-41.84	-16.24	1.15	7.43	-4.64	-94.55	
TOTALES			-197.04	210.73	-523.78	498.53	730.34	30.14	-991.07	857.88	-264.41	477.89	-29.23	799.99	





**Figura 5-14:** Volúmenes de intercambio hídrico en las ciénagas del Bajo Magdalena período JJA/2009 – DEF/2012 y condiciones de frontera (entrada y salida).

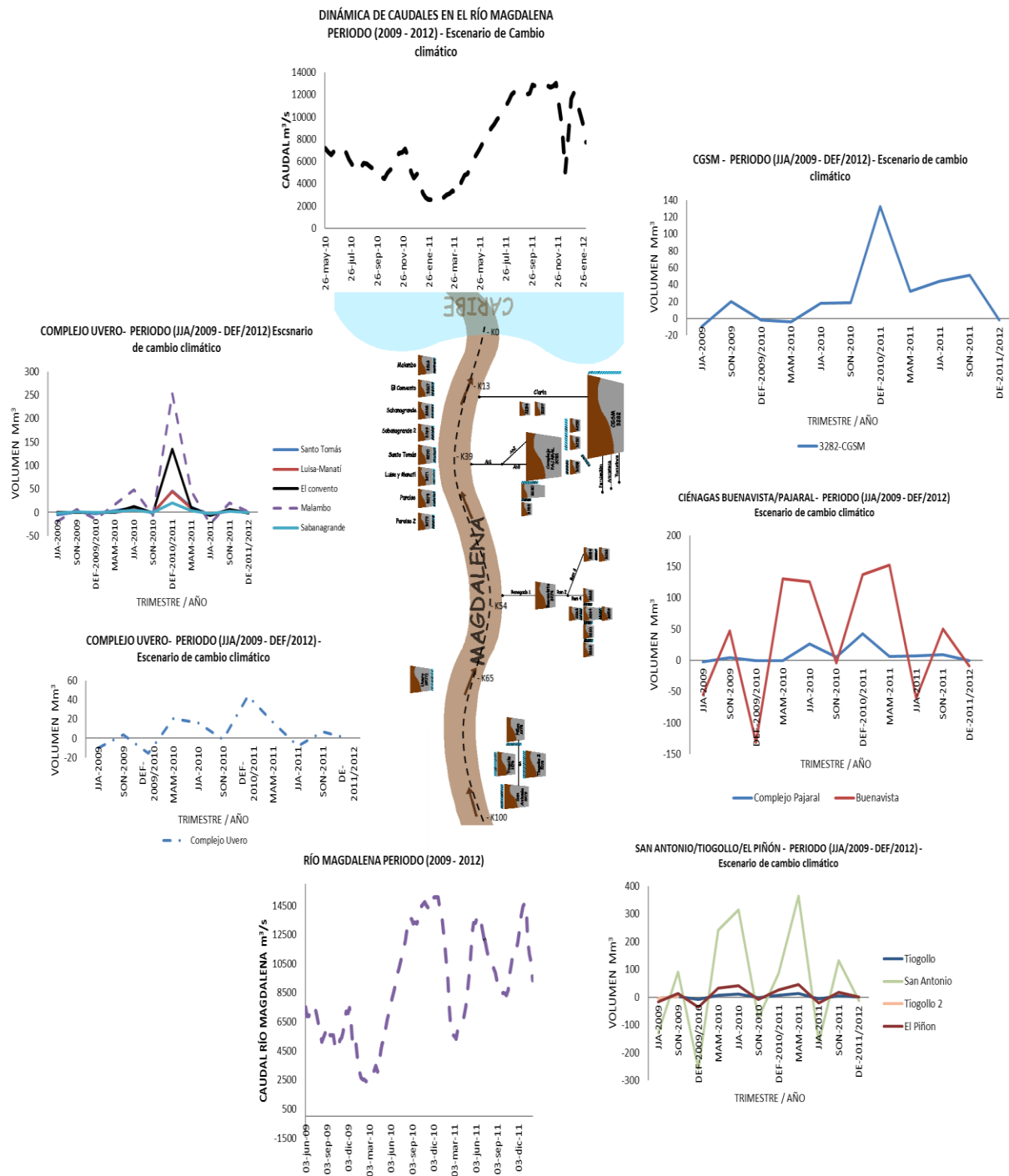
Los resultados descritos en las figuras anteriores corresponden a la modelación 1D realizada, con los niveles de agua de la estación Dársena Barranquilla como condición de frontera aguas abajo. Sin embargo, a modo de análisis adicional, se presenta en esta investigación un escenario de sensibilidad de los resultados ante la variación de la condición de frontera, esto con el objetivo de tener una mejor percepción de la importancia de la medición rigurosa aguas abajo y en sitios intermedios del macrosistema de estudio.

Es así, como en un posible escenario de cambio climático se ha decidido aumentar en 1.0 m a la condición de frontera aguas abajo, suponiendo por ejemplo una afectación por remanso en el canal principal del río Magdalena inducido por el Mar Caribe, aumento último por cambio climático. La nueva condición de funcionamiento resulta tener un efecto inmediato y extremo en la magnitud de los volúmenes de intercambio río Magdalena – ciénagas y viceversa. El volumen de intercambio de agua dulce hacia la CGSM tiene ahora un máximo de 298 Mm<sup>3</sup>, un aumento del 78%, en comparación a la modelada con datos originales (Estación Dársena Barranquilla), donde el máximo fue de 168 Mm<sup>3</sup> al final de todo el período de modelación. También el comportamiento de los volúmenes en el tiempo cambia para esta ciénaga, donde el valor máximo se presenta ahora en el trimestre DEF de 2011 (diciembre, enero, febrero de 2011), mientras que en la condición modelada el volumen máximo se da en el trimestre SON del 2011 (septiembre, octubre, noviembre de 2011), siete meses después. Un resumen del volumen de intercambio para la totalidad de las ciénagas en el período de modelación (2009 – 2012) se presenta en la Tabla 5-3, mientras que el comportamiento detallado de esta condición extrema se resume en la Figura 5-15.

Es evidente entonces la sensibilidad del macrosistema río Magdalena, Mar Caribe, ciénagas, y el por qué la necesidad de que su estudio se aborde de forma integral o completa, tal como ha sido propuesto e intentado en esta investigación. Si bien lo extenso de la zona, la disponibilidad de información, dificultan el control de la multiplicidad de variables presentes en todo el sistema, resulta prioritario aunar esfuerzos para tener mejores herramientas, quizás basadas en las aquí desarrolladas, que permitan día tras día mejorar la calidad de estos análisis de intercambios hídricos, riesgo de inundación, impacto de estructuras, etc.

**Tabla 5-3:** Comparación de volúmenes de intercambio en la totalidad de ciénagas del área de estudio. Escenario modelado con datos estación Dársena Barranquilla vs datos de niveles aumentados hipotéticamente 1.0 m en esta misma estación.

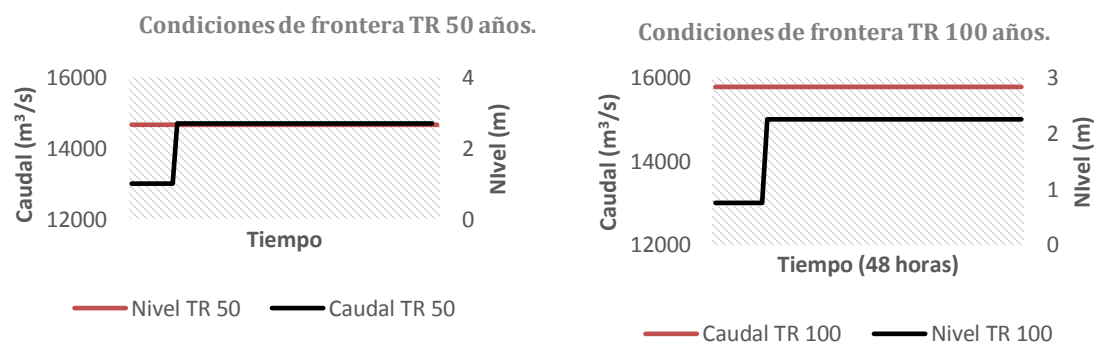
ID CIÉNAGAS	Margen / Departamento	ESCENARIO MODELADO	ESCENARIO SUPUESTO	DIFERENCIA
		TOTALES NETOS Mm <sup>3</sup>	TOTALES NETOS Mm <sup>3</sup>	
3254	Derecha / Magdalena	3.11	6.96	124
3255	Derecha / Magdalena	0.00	0.00	0
3256	Derecha / Magdalena	4.69	5.00	7
3257	Derecha / Magdalena	5.14	10.63	107
3258	Derecha / Magdalena	0.69	1.53	121
3259	Derecha / Magdalena	3.89	12.36	218
3260	Derecha / Magdalena	11.65	24.35	109
3261	Derecha / Magdalena	13.13	54.02	311
3262	Derecha / Magdalena	20.40	75.73	271
3263	Derecha / Magdalena	42.75	83.78	96
3264	Derecha / Magdalena	7.14	22.52	215
3265	Derecha / Magdalena	3.68	10.18	177
3280	Derecha / Magdalena	3.59	-0.16	104
3282-CGSM	Derecha / Magdalena	168.06	298.44	78
3283	Derecha / Magdalena	0.11	-0.41	462
3284	Derecha / Magdalena	7.63	33.35	337
Buenavista	Derecha / Magdalena	88.36	394.65	347
Complejo Uvero	Izquierda / Atlántico	6.60	74.51	1028
El convento	Izquierda / Atlántico	7.61	155.09	1939
Luisa-Manatí	Izquierda / Atlántico	4.16	59.60	1333
Malambo	Izquierda / Atlántico	22.17	330.59	1391
Complejo Pajalal	Derecha / Magdalena	38.49	96.31	150
Pariso	Izquierda / Atlántico	2.14	29.69	1289
Pariso 2	Izquierda / Atlántico	0.58	7.75	1227
El Piñon	Derecha / Magdalena	38.28	96.83	153
Sabanagrande	Izquierda / Atlántico	2.23	27.75	1142
Sabanagrande 2	Izquierda / Atlántico	1.97	20.18	922
San Antonio	Derecha / Magdalena	127.55	625.80	391
Santo Tomás	Izquierda / Atlántico	6.76	64.06	847
Tiogollo	Izquierda / Atlántico	251.96	27.86	89
Tiogollo 2	Izquierda / Atlántico	-94.55	16.45	117
<b>TOTALES</b>		<b>799.99</b>	<b>2665.40</b>	<b>233.18</b>



**Figura 5-15:** Volúmenes de intercambio hídrico en las ciénagas del Bajo Magdalena período JJA/2009 – DEF/2012 y condiciones de frontera aguas abajo aumentada 1.0 m.

## 5.2 Resultados de zonas susceptibles a inundación, criterio conjunto de modelación matemática y dinámica fluvial.

Los resultados de la modelación matemática en hidráulica se presentan para los caudales con períodos de retorno de 100 y 50 años y nivel de lámina de agua alta en las ciénagas, escenarios considerados más desfavorables y factibles en aras de representar el riesgo por inundación y las posibles afectaciones en la zona de estudio. Se tomaron entonces los niveles de agua en las ciénagas, resultado de la segunda temporada invernal modelada, específicamente el día 28/12/2011 como condición crítica, mientras que los valores de caudales de entrada se convirtieron en un hidrograma de duración 2 días, donde a partir de las 4 horas de modelación se presenta el caudal del período de retorno deseado, logrando con esto que el modelo matemático realice las derivaciones de caudal en los nodos y hacia las ciénagas a través de los vertederos de conexión, teniendo en cuenta las condiciones de frontera de cada tramo y/o elemento analizado. Así, se modela para los caudales de entrada de 15,000 m<sup>3</sup>/s y 14,700 m<sup>3</sup>/s, correspondientes a los períodos de retorno de 100 y 50 años, respectivamente. Cada escenario contó además con su correspondiente condición de frontera, aguas abajo, 2.83 m y 2.66 m, respectivamente; estos niveles de agua obtenidos a partir de la ecuación desarrollada en el análisis hidrológico realizado en esta investigación y detallado en el Capítulo 4. Ver Figura 5-16.



**Figura 5-16:** Condiciones de frontera para escenario de inundación con períodos de ocurrencia de 1 cada 50 años y 1 cada 100 años. Condiciones de frontera (entrada y salida).

Los resultados de la modelación matemática para el TR 100 se resumen en Figura 5-18, donde son comparados con el resultado de la inundación por geomorfología (dinámica fluvial) y con el reporte de inundación del Canal del Dique para el año 2011 (IGAC).

En primer lugar, es apreciable como el modelo *1D* representa razonablemente bien la zona afectada en el 2011 y reportada por el IGAC. Esta afectación no se debió estrictamente al desborde del río Magdalena en su canal principal, sino también al desborde del canal Tiogollo, conectado a la Ciénaga San Antonio, con lo cual se afectó el corregimiento del Piñón (K85). Hacia la margen derecha del río Magdalena también se aprecia una posibilidad de desborde del río cerca al municipio de Salamina (K80) y Remolino (40) y más aguas abajo un desborde en el municipio de Sitio Nuevo, después del caño Aguas Negras; estos sí, por aparente falta de capacidad del río Magdalena. En el caso de la margen izquierda, departamento del Atlántico, si las ciénagas tuvieran un nivel de agua entre 2 a 3 m.s.n.m y se presentara un caudal para el período de retorno de 100 años, durante más de 4 horas, estas se desbordarían, generando un riesgo de inundación hacia los municipios de Suan, Palmar de Varela, Santo Tomás, y Sabanagrande; municipios que tienen diques de protección cuyas alturas no fue posible representar a través del hidroDEM elaborado para la modelación matemática. Nótese además que el riesgo de inundación hacia Barranquilla es bastante limitado aún para un período de retorno de 1 en 100 años.

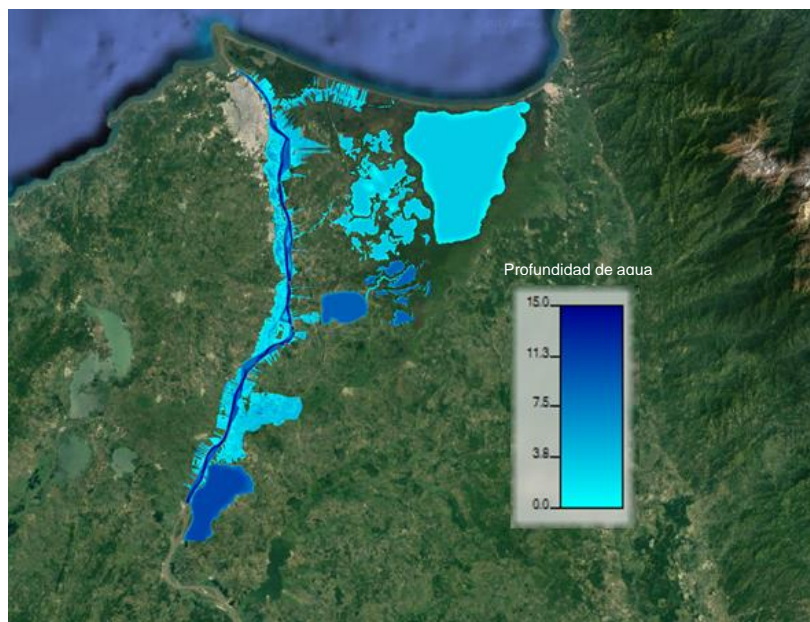
En las Figura 5-18 a Figura 5-24, se presentan como apoyo a los resultados descritos anteriormente, una serie de mapas detallados con la mancha de inundación TR100 años sobre imagen *Google Earth* de la zona de estudio, resaltando las zonas susceptibles a inundación en este período de retorno. Los colores más oscuros representan mayor profundidad en la lámina de agua y los colores más claros una menor profundidad de agua. Cabe anotar, que se debe tener especial cuidado con la interpretación de estas imágenes dado que la información topográfica limita la extensión de la mancha de inundación y puede enmascarar el riesgo hacia las poblaciones allí asentadas.

En el caso de la inundación por geomorfología, el caudal con período de retorno de 100 años queda contenido en esta franja, para gran parte del tramo de estudio, franja que incluye las ciénagas conectadas directamente con el río Magdalena en la margen

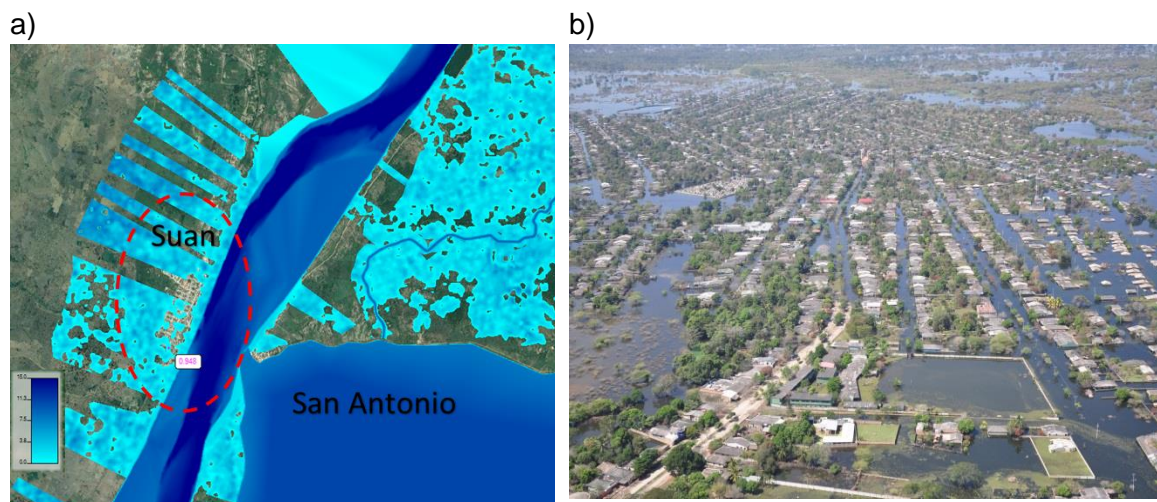
[illegible]

**Figura 5-17: Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena.**



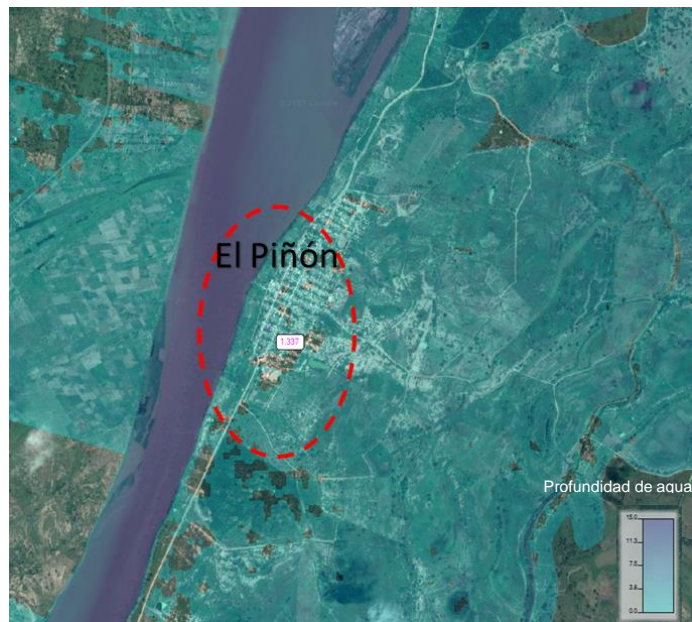


**Figura 5-18:** Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, sobre imagen Google Earth.

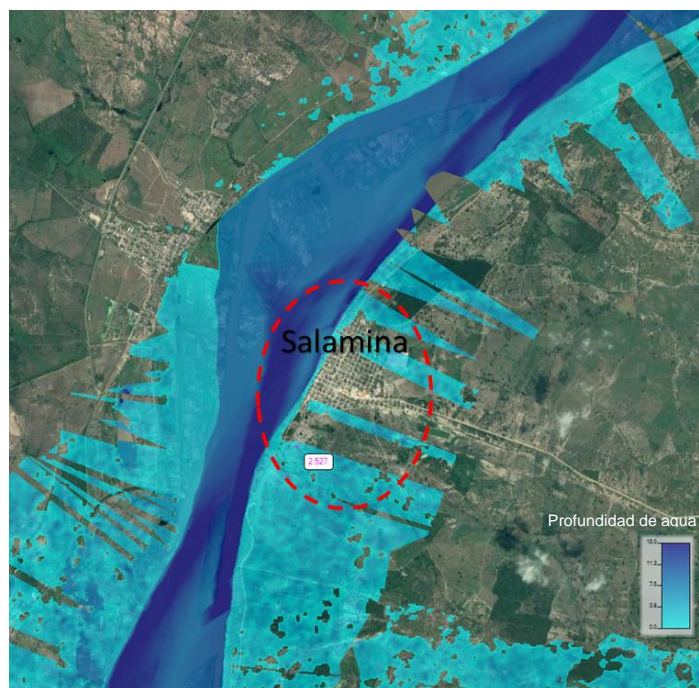


**Figura 5-19:** Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, Nivel de agua hasta de 1.00 m en el Municipio de Suan (K100) en la margen occidental. Al costado oriental desborde de la conexión entre ciénagas San Antonio (K100) y El Piñón (K85). b) Registro fotográfico municipio de Suan (26/01/2011) en la ocurrencia de la Fase Niña del ENOS en 2011. Parte baja de la zona de estudio. Fuente: IDEHA - Gobernación del Atlántico, 2011.

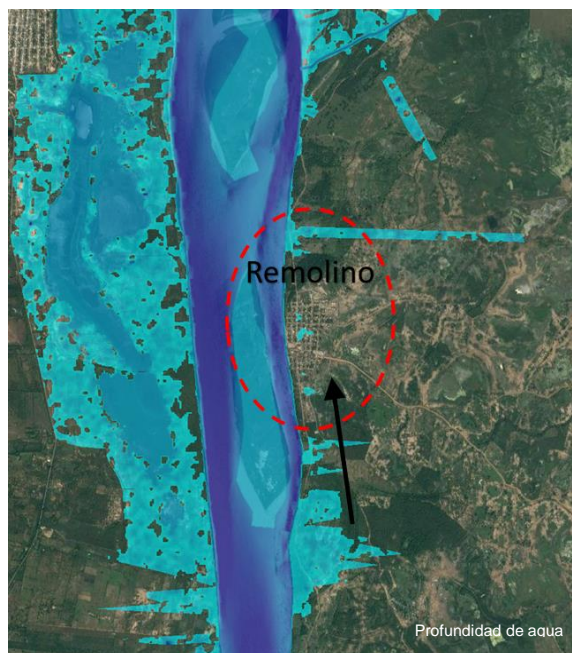




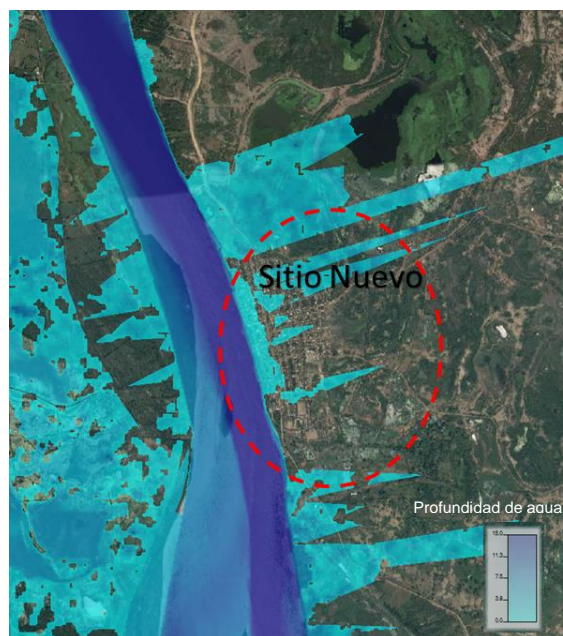
**Figura 5-20:** Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, Nivel de agua hasta de 1.30 m en el Municipio de El Piñón (K85) en la margen oriental.



**Figura 5-21:** Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, Nivel de agua hasta de 1.30 m en el Municipio de Salamina (K80) en la margen oriental (Departamento de Magdalena).

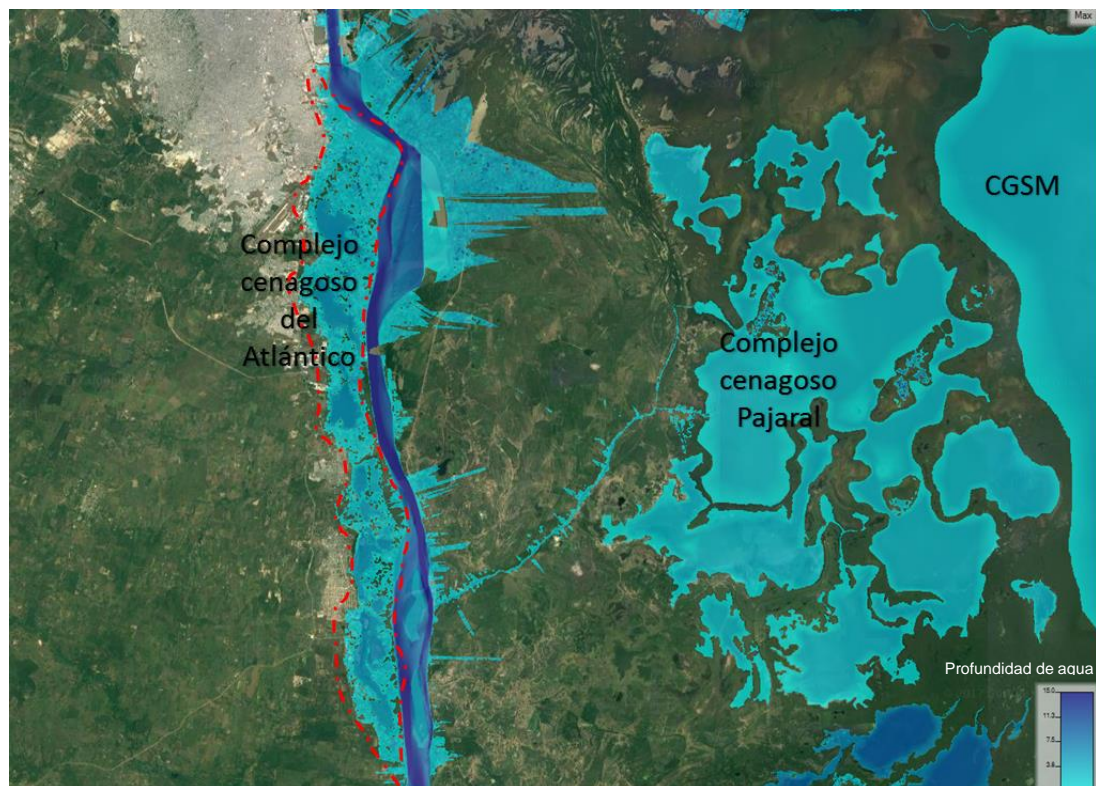


**Figura 5-22:** Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, riesgo de desborde aguas arriba del Municipio de Remolino (K40) en la margen oriental (Departamento de Magdalena). Ciénaga Paraíso en su máxima capacidad.



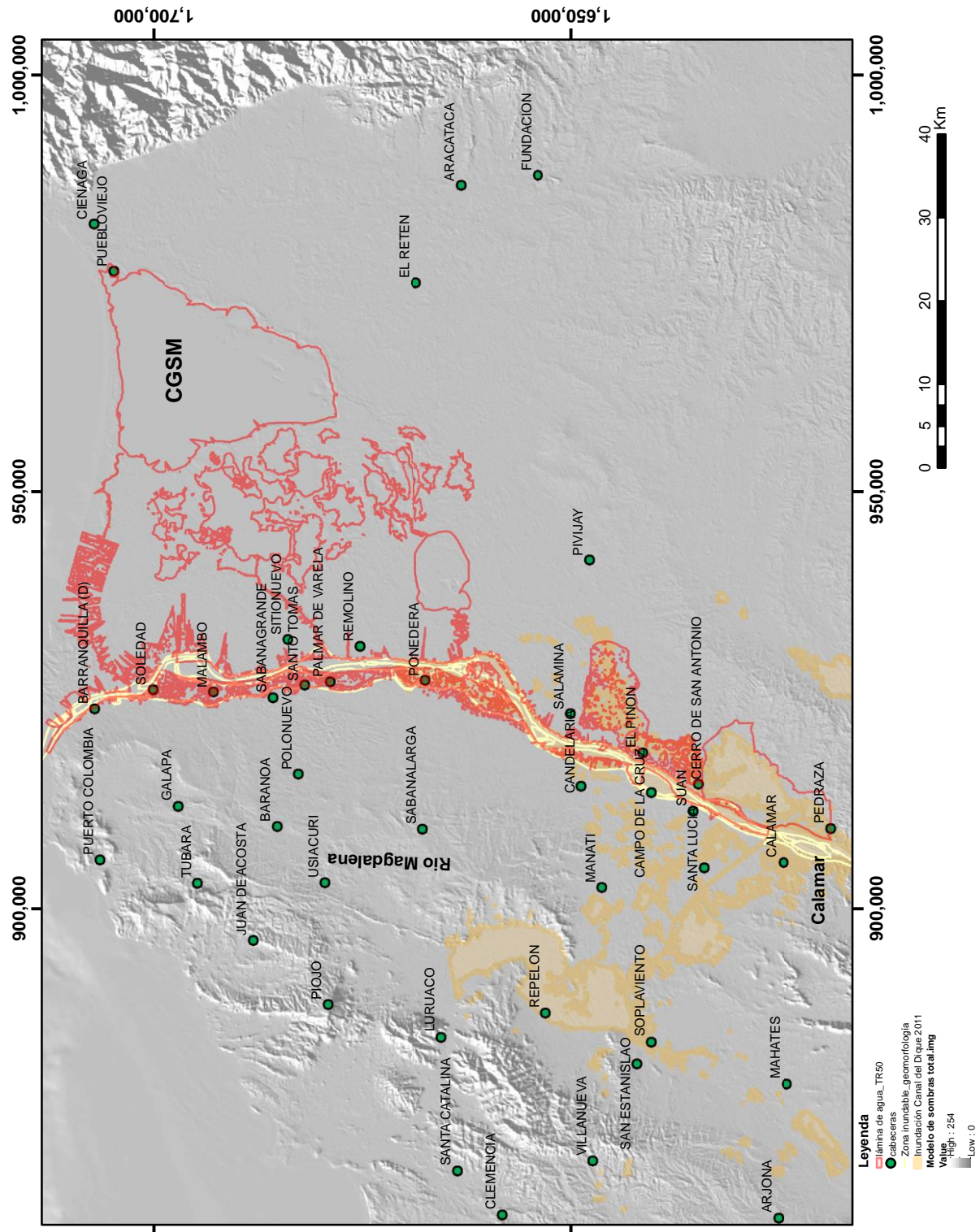
**Figura 5-23:** Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, riesgo de desborde aguas arriba del Municipio de Sitio Nuevo (K34) en la margen oriental (Departamento de Magdalena). Ciénaga Paraíso en su máxima capacidad.





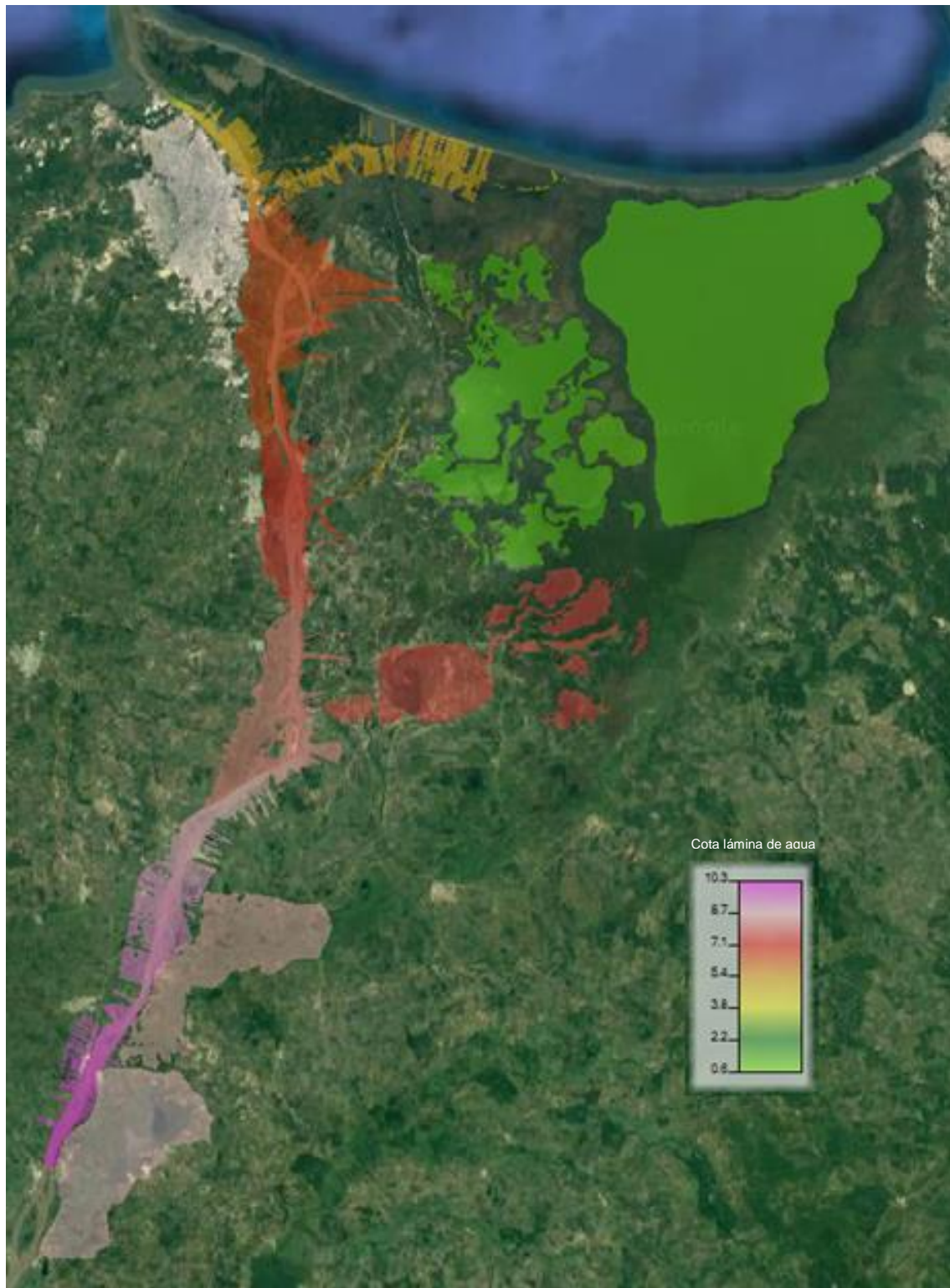
**Figura 5-24:** Inundación caudal Tr 100 años en el Bajo Magdalena, extensión del complejo cenagoso del Atlántico entre el K40 - K20 las ciénagas: Paraíso, Santo Tomás, Sabanagrande, El convento y Malambo.

Para el caudal con período de retorno de 50 años, la afectación hacia el departamento del Magdalena persiste en el canal Tiogollo y los municipios de El Peñón. Salamina, Remolino y Sitio Nuevo. Los caños Clarín, Aguas Negras y Renegado presentan también desbordamientos por falta de capacidad. Mientras que, hacia el departamento del Atlántico, se sigue presentando el riesgo de inundación en las poblaciones de Suan, Palmar de Varela, Santo Tomás, y Sabanagrande, esta vez con disminución aproximada de 0.05 m. en la lámina de agua en comparación con el TR 100 años, lo cual se explica por la variación en el nivel de la condición de frontera aguas abajo. En la Figura 5-25 la mancha de inundación y en la Figura 5-26 las cotas de agua en el sitio de estudio, ambos con período de retorno de 50 años. Ver también el anexo 3.



**Figura 5-25:** Inundación caudal Tr 50 años en el Bajo Magdalena.





**Figura 5-26:** Cota de lámina de agua en la zona de estudio. Tr 50 años.

### 5.3 Comentarios finales sobre el Capítulo 5

Los intercambios hídricos analizados en la zona de estudio han demostrado tener un comportamiento cíclico entre el río Magdalena y las ciénagas asociadas, además con una alta sensibilidad a la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos como el ENOS en sus fases El Niño y la Niña. Para el tiempo de modelación seleccionado en este análisis (mayo 2009 – febrero 2012), correspondiente al período Normal, El Niño y La Niña, en general existe un comportamiento cíclico con frecuencia controlada por los caudales entrantes al sistema a través del río Magdalena, primero en dirección ciénaga – río Magdalena, debido a la condición de caudales bajos en el río a causa del período seco antecedente en la cuenca del río Magdalena. Para la condición denominada aquí período La Niña 1, correspondiente al segundo semestre del año 2010 y comienzos del año 2011, donde los niveles de agua aumentaron en el cauce del río Magdalena y los afluentes a las ciénagas, ocasionando que la dirección del flujo se invirtiera a causa del mayor gradiente hidráulico en el cauce, con lo cual se presenta flujo de agua dulce y fresca principalmente hacia las ciénagas, llenándolas. Seguidamente, se presentó en la zona el período la Niña 2, el cual, por la magnitud de sus caudales fue menor a la Niña 1. Sin embargo, al presentarse en un instante en el cual las ciénagas se encontraban con niveles altos (llenas), originó que los caudales derivados hacia las mismas disminuyeran y en algunos casos invirtieran nuevamente la dirección de flujo.

Resulta evidente entonces la importancia de este complejo cenagoso como regulador de caudales pico hacia las poblaciones más aguas abajo, principalmente Barranquilla y su área metropolitana, además, la relevancia de los aportes de agua dulce y fresca desde el río Magdalena al complejo cenagosos Pajara y la CGSM, a través de los caños Clarín, Aguas Negras y Renegado, los cuales pueden llegar a sumar un 10% del caudal de río Magdalena en Calamar.

También en este Capítulo fue discutido un escenario hipotético de niveles extremos en la condición aguas abajo del macrosistema, encontrando que la sensibilidad de este resulta ser bastante importante. Un cambio de +1.00m en la condición aguas abajo, cambiaría excesivamente la dinámica del sistema, los porcentajes de volúmenes derivados desde y

hacia las ciénagas circundantes y la CGSM. Lo anterior, sugiere un compromiso en la medición de todo el macrosistema y la modelación integrada como la aquí propuesta para un mejor entendimiento del mismo.

Con respecto a las zonas susceptibles a inundaciones, estas se determinaron teniendo en cuenta niveles altos en las ciénagas (2 a 3 m.s.n.m), por considerarla la condición más desfavorable y un escenario factible con ocurrencia en el período modelado (2009 - 2012). Con una menor capacidad reguladora de las ciénagas, sumado a los controles de flujo en las zonas de inundación (vías, diques, etc.), ubicados en la llanura inundable, la amenaza por inundaciones lentas se aprecia mayormente en los corregimientos aledaños a las mismas, como son los municipios de Suan (K100), Santo Tomás (K50) y Sabanagrande (K30), en el departamento del Atlántico; mientras que, los municipios como El Piñón (K85), Salamina (K80) y Remolino (K40), en el departamento del Magdalena también podrían ser afectados. En algunos casos la inundación no es debida estrictamente al río Magdalena, pero si, al desbordamiento de los caños conectados a él y al control que este puede ejercer sobre alcantarillas y otro tipo de estructuras hidráulicas que descargan a él. Las estructuras no pudieron ser incluidas en la modelación por falta de información de detalle sobre las mismas.

No obstante, se debe tener presente que el resultado de las modelaciones aquí presentadas tiene la incertidumbre asociada a la limitada información disponible y a la calidad de la misma; ejemplo de ello es el MDT, ya que, a pesar de los esfuerzos en la búsqueda de mejor información, y a la generación aquí de un modelo matemático calibrado utilizando los productos de sensores remotos y evaluado a partir de un parámetro numérico " $F$ ", además del análisis visual los resultados aquí presentados se deben juzgar con estas consideraciones.

Se debe así tener prudencia con los resultados reportados principalmente, por las limitantes de la modelación, donde se destacan la falta de una mayor serie de datos consistentes entre las condiciones de entrada aguas arriba y la condición de control aguas abajo, caudales hacia los caños, medición de niveles en ciénagas, topobatimetría de todas las ciénagas y batimetría actualizada de la franja de inundación del río, con lo cual se podría realizar una mejor validación de los resultados. Sin desmedro de esto, los resultados

de manchas aquí reportados deben ser tomados como una importante referencia, dado que integran, a escala regional, el análisis de todo el hidrosistema de forma integral.



## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1 Conclusiones generales**

La microrregión del Bajo Magdalena, entre Calamar y Bocas de Ceniza, presenta importantes potencialidades ambientales e hídricas, con un enorme conjunto de variables físico-bióticas y socio-económicas, que interactúan entre sí y que la convierten en un caso muy interesante de estudio, por ejemplo, de intercambios hídricos río – ciénagas y viceversa, no solo por la extensión general del área, la cual es aproximadamente de 8,000 km<sup>2</sup>, incluyendo las zonas aportantes de caudal provenientes de la SNSM, sino fundamentalmente, por la información limitada sobre este importante hidrosistema.

En esta investigación, el análisis del sistema ha constituido un enorme desafío y se ha realizado de forma integral, implementando herramientas computacionales a partir de la información primaria y secundaria disponible, complementada con información secundaria procedente de diferentes sensores remotos, en aras de suplir la limitante de información primaria y lograr así un análisis más adecuado del mismo. Esto ha permitido efectuar una base de datos digital y con ello abordar la modelación matemática en hidrología e hidráulica del hidrosistema, contribuyendo a un mejor entendimiento de su comportamiento hídrico superficial. Sin embargo, a pesar del riguroso esfuerzo de revisión bibliográfica realizado, este de ninguna forma ha sido exhaustivo y por ende existen referencias no incluidas en el documento que posiblemente hubieran podido darle más información al trabajo; por consiguiente, este trabajo no puede considerarse como el primero ni el último al respecto, sino sencillamente una pequeña contribución al entendimiento integral del hidrosistema.

Para la calibración y validación del modelo hidráulico se han utilizado datos de imágenes satelitales clasificadas para la cobertura agua. Si bien es cierto por las limitaciones de información y por el desafío que significa abordar el análisis regional de este enorme hidrosistema, los resultados estrictamente no resultan ser totalmente concluyentes, sí son

satisfactorios, dada la calidad en la información disponible para la investigación. Se ha logrado una combinación del parámetro sensible “ $n$ ” Manning, dentro de un rango considerado aceptable para las características del cauce analizado, este valor fue 0.024 en el cauce principal y un valor generalizado de 0.032 para la zona inundable. A modo de comparación, (IDEHA-Cormagdalena, 2012), reporta para la zona entre el K19- K38 del río Magdalena el empleo de un valor de 0.028, implementando la herramienta computacional MIKE – 21C y calibrando a partir de datos de campo. De otra parte (Amador, 2013) entre el K38 y K68 reporta 0.024 también para el cauce principal pero aplicando la herramienta computacional SOBEK 1D-2D y calibrando a partir de imágenes satelitales Landsat TM.

Con la implementación de la metodología del Balance Hídrico de Largo Plazo (BHLP) en conjunto con la modelación matemática en hidrología realizada a través de la implementación del modelo HEC-HMS en 33 subcuencas, esta investigación logró corroborar que los caudales aportantes a las ciénagas del Bajo Magdalena, son varios órdenes de magnitud menores que los caudales entrantes al sistema y que provienen de las cuencas aguas arriba del municipio de Calamar (departamento de Bolívar) y los afluentes de la SNSM, estos últimos entrantes a la CGSM que se interconecta con el río Magdalena a través de los años Renegado, Aguas Negras y Clarín, más aguas abajo. Con esta información se logró incluir de manera satisfactoria caudales diarios entrantes en las cuencas asociadas a las ciénagas y junto con los datos medidos sobre el hidrosistema, a partir de estaciones hidrológicas del IDEAM (Calamar, Incora K7 y Dársena Barranquilla), se logró efectuar la implementación de un modelo integrado río – ciénagas, que incluyera la totalidad de la zona hasta la CGSM.

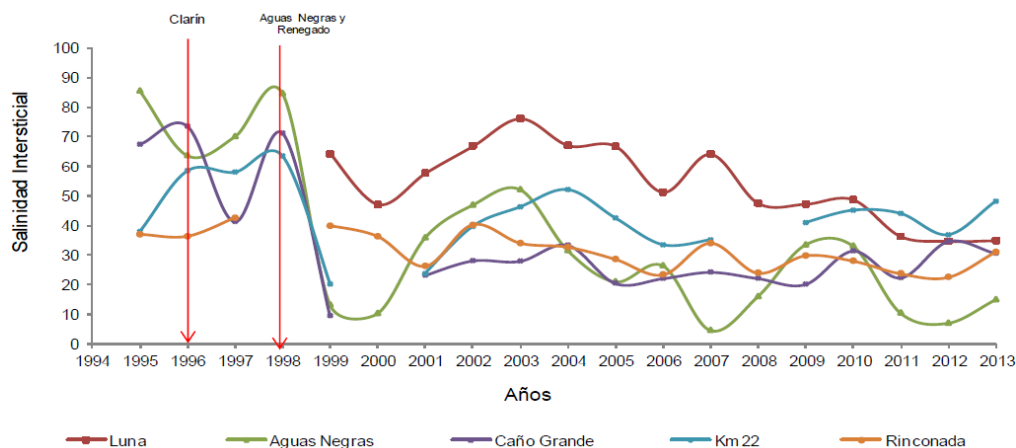
En esta investigación, se ha propuesto e implementado de manera satisfactoria una metodología para el estudio regional de hidrosistemas complejos con información limitada o escasa, utilizando herramientas computacionales existentes y de uso público, principalmente. Dicha metodología, aplicada en la zona de estudio, requirió la recopilación de información de distintas entidades y fuentes, las cuales tienen injerencia en el hidrosistema del Bajo Magdalena, entidades, que ahora podrán contar con una herramienta que permite apoyar el estudio integral de la zona y el análisis de posibles

impactos de diferentes escenarios climáticos y/o antrópicos sobre el flujo de agua superficial en el mismo.

### **Intercambio hídrico.**

Es notable la capacidad de regulación de caudales instantáneos que tienen las ciénagas asociadas e interconectadas al río Magdalena en la zona de estudio, las cuales regulan hasta el 10% de los caudales presentes en el río Magdalena después de la derivación de los caudales a través del Canal del Dique (ver anexo 2). El 70% de esta regulación es realizada por las ciénagas ubicadas al costado occidental y que en su mayoría se conectan directamente al río Magdalena, el 30% restante es regulado por el costado oriental. El sistema río Magdalena – Ciénagas queda desconectado cuando en el primero se presenten valores de caudal del orden de 2000 m<sup>3</sup>/s o menos, como el registrado en febrero 16 de 2010 y que fue antecedido de tiempo seco. Esta regulación es del mismo orden de magnitud de los caudales derivados a través del Canal del Dique (CORMAGDALENA-UNAL, 2007), regulación que permite menores niveles hacia aguas abajo y con ello reducción del riesgo de inundación. En el período de análisis seleccionado (2009 – 2012), donde se presentan fenómenos macroclimáticos como el ENOS en sus fases El Niño y la Niña, el comportamiento de los volúmenes de intercambio es cíclico, presentando mayores valores hacia los meses de marzo, abril y mayo MAM (2010), MAM (2011) y septiembre-octubre-noviembre SON (2011), con las ciénagas descargando los mayores volúmenes en los trimestres diciembre-enero-febrero DEF (2009 - 2010), DEF (2010 - 2011) y junio-julio-agosto JJA (2011), es decir, con un comportamiento de vaciado de ciénagas anual para el primer período de lluvias y semestral para el segundo. Las mayores receptoras de caudales en el período de análisis resultan ser la CGSM, San Antonio y el complejo cenagoso Pajara, con un volumen neto entrante de (+168 Mm<sup>3</sup>), (+127.55) y (+38.49 Mm<sup>3</sup>) respectivamente, mientras que en la ciénaga Tiogollo 2 priman los volúmenes netos de salida (-94.55 Mm<sup>3</sup>), estos últimos, no son hacia el río Magdalena sino también hacia la ciénaga Tiogollo, interconectada con la ciénaga San Antonio (K100). En la margen occidental, departamento del Atlántico, los mayores volúmenes de intercambio se presentan hacia las ciénagas Malambo (K20), El Convento (K29), Santo Tomás (K37) y el complejo cenagoso El Uvero (entre el K56 al K71), con valores de (+22.17

Mm<sup>3</sup>), (+7.61 Mm<sup>3</sup>), (6.76 Mm<sup>3</sup>) y (+6.60 Mm<sup>3</sup>), respectivamente; priman caudales de entrada desde el río Magdalena, los cuales resultan relevantes de mantener, evitando que los diques alrededor de estas ciénagas las aislen del sistema río Magdalena – Ciénagas. La importancia de estos volúmenes de intercambio ha sido ampliamente documentada en la literatura. A modo de ejemplo los impactos medidos en la salinidad de agua en el complejo cenagoso Pajalar y la CGSM, antes y después de la reactivación de los caños Clarín y Renegado, indican que los valores de salinidad han venido disminuyendo como resultado de los mayores intercambios (ver Figura 6-1) (INVEMAR, 2013). Esto confirma aún más la importancia de la modelación integral aquí realizada, la cual, se puede seguir alimentando en función de la mejor información generada por las entidades que tienen jurisdicción en el macrosistema.

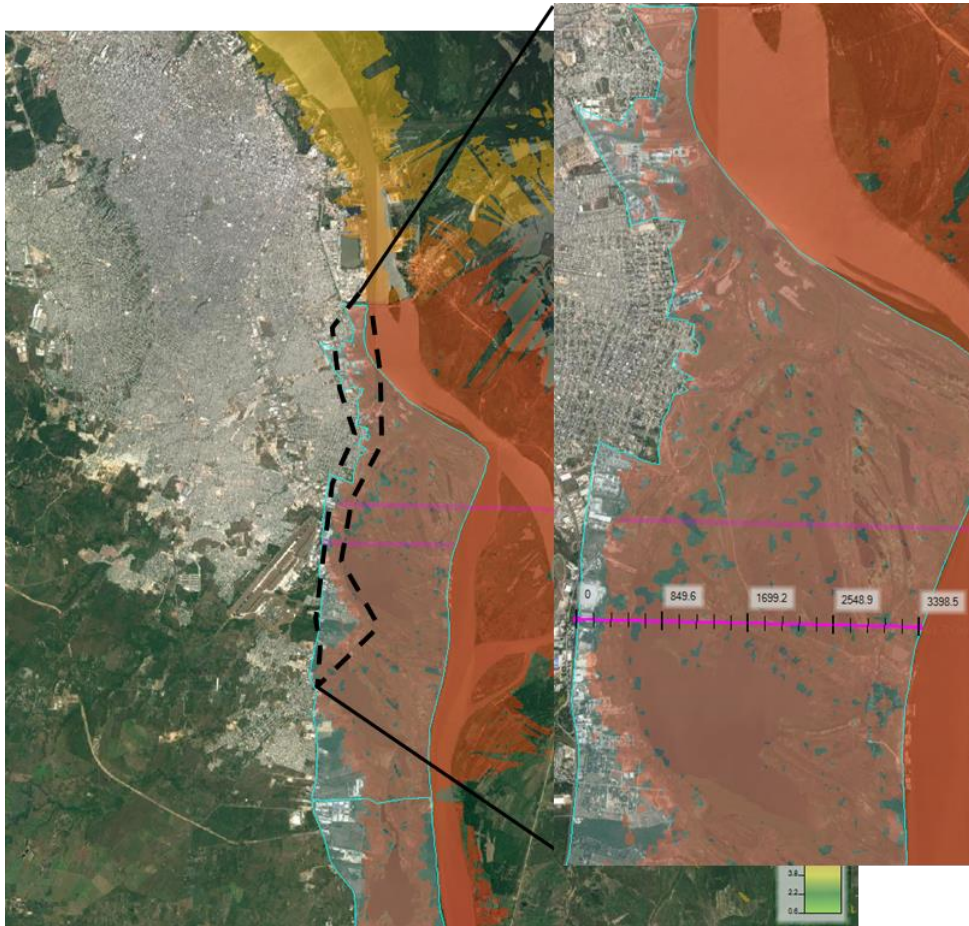


**Figura 6-1:** Salinidad intersticial (0.5 m) promedio registrada en los suelos de manglar de cinco estaciones de monitoreo durante el período 1995-2013. Las flechas rojas indican la apertura de los caños Clarín (año 1996), Aguas Negras y Renegado (año 1998). Fuente: INVEMAR (2013)

## Dinámica fluvial y Zonas inundables.

Dando respuesta a uno de los principales objetivos planteados al abordar esta investigación, se obtuvo una representación de la llanura inundable mediante la aplicación de un criterio conjunto de geomorfología y dinámica fluvial y modelación matemática, esta

última a partir de un modelo 1D. Los resultados a este respecto son satisfactorios pero limitados por la calidad de la información topográfica de detalle existente. La dinámica fluvial indica que las ciénagas circundantes al río Magdalena, principalmente entre el K60 y K13, hacen parte activa del hidrosistema natural y que estas son parte de la llanura aluvial de inundación, la cual ha sido altamente intervenida por diques y otras estructuras de regulación, por lo cual deben mantenerse conectadas al río Magdalena, se reitera. Estos cuerpos de agua con funciones de regulación de caudales hacia aguas abajo son representados también en los resultados de la modelación matemática implementada para la zona, para los diferentes períodos de recurrencia, 1 en 100 años y 1 en 50 años. Además, se han identificado claramente cuatro zonas de desborde para ambos períodos de retorno, los cuales son el K19 a la altura de la isla Rondón, K34 municipio de Sitio Nuevo, K40 municipio de Remolino, K80 municipio de Salamina, y el K100 entre la ciénaga San Antonio y la ciénaga Tiogollo cuya afectación se extiende aguas arriba hacia el municipio de El Piñón K85, estas en la margen oriental. Hacia la margen occidental el riesgo más representativo es hacia el municipio de Suan (100), pero deben ser incluidos en detalle los diques para ser concluyentes. Como resultado final y respondiendo a la pregunta de investigación planteada, también con la modelación integral aquí presentada fue posible elaborar una propuesta para la delimitación del complejo cenagoso del costado oriental, evidenciando que este en algunos casos tiene presencia de infraestructuras, las cuales están en riesgo de inundación para los períodos de retorno de 100 y 50 años. La **Figura 6-2** resume el caso de la Ciénaga Malambo, mientras que en el anexo 3 se encuentra la totalidad del complejo cenagoso del departamento del Atlántico.



**Figura 6-2:** Delimitación propuesta para la ciénaga Malambo (K20) a partir de criterio hidráulico. Se identifican en color cian la extensión propuesta, 3.4 km a partir del río Magdalena, en color rojo la afectación en la zona con una cota de agua 6.60 m.s.n.m. Tr 50 y Tr 100 años. Predios afectados considerados dentro de la ciénaga.

## 6.2 Limitaciones y recomendaciones generales

Importantes limitaciones fueron encontradas en el desarrollo de esta investigación. Por ejemplo, la falta de información detallada de las estructuras hidráulicas existentes (compuertas, etc.), condición de frontera aguas abajo con información limitada, topobatimetrías faltantes de caños y ciénagas existentes, entre otros aspectos; limitaron los resultados y análisis aquí reportados. Por lo anterior, se presenta una serie de aspectos relevantes que pueden ser abordados en un futuro, en aras de emprender investigaciones similares y/o fortalecer la aquí realizada, investigaciones tendientes a mejorar las

herramientas computacionales generadas, el modelo computacional en hidrología (HEC-HMS), el modelo computación en hidráulica (HEC-RAS) e incluso el modelo bidimensional con la herramienta *Iber 2D* de la zona de estudio. Este último modelo, a pesar de no ser ampliamente reportado aquí, pues sus análisis requieren de una importante capacidad computacional, en caso de ser mejorada la información topobatimétrica podrá ser un nuevo alcance a futuro de esta investigación.

Cabe destacar además que no se ha incluido información sobre flujo sub-superficial (aguas subterráneas) y aquí habría un amplio espacio para acoplar una modelación aguas superficiales – aguas subterráneas.

### **Recomendaciones costado occidental del río Magdalena jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA)**

Están orientadas a la medición en zonas de ciénagas, estas mediciones deben ser principalmente valores de altura en las ciénagas de la jurisdicción, en aras de poder mejorar los ejercicios de calibración de la modelación matemática aplicada. También, se recomienda la revisión, levantamiento y mantenimiento de estructuras actuales, control a la implantación de estructuras futuras de contención teniendo en cuenta la integralidad del sistema.

### **Recomendaciones costado oriental del río Magdalena jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG).**

Orientadas también a la medición en zonas de ciénagas, revisión y mantenimiento de estructuras actuales de contención y de medición de caudales derivables hacia la ciénaga, mantenimiento de caños de conexión río- ciénaga. Inclusión del monitoreo de la calidad de agua, control a la generación de estructuras futuras de contención teniendo en cuenta la totalidad del sistema. Debe ser imperativo el conocimiento de la topobatimetría de las ciénagas en este costado del sistema y con ello la información actual de la topografía, ya que a causa de la intervención antrópica esta ha cambiado e impide una comparación eficaz de los resultados de la modelación matemática como elemento de gestión.

## **Recomendaciones río Magdalena jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del río grande de la Magdalena (CORMAGDALENA).**

Inclusión en la modelación de sedimentos junto con las modelaciones hidráulicas de la zona de estudio, gestionar la información referente a las ciénagas conectadas al río Magdalena para la delimitación de rondas hídricas.

## **Recomendaciones Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.**

Gestionar dentro del marco de la PNGIRH y la Política Nacional de Monitoreo, la adecuada generación de información hidroclimatológica e hidráulica del hidrosistema río Magdalena - ciénagas – CGSM. Para lo cual se presenta la recomendación sobre instalación de estaciones hidroclimatológicas que permitan la adecuada implementación de los protocolos de modelación incluyendo las fases de calibración y validación, además de la utilización de herramientas secundarias como son productos de sensores remotos. (Mapa de estaciones requeridas según la deficiencia de información encontrada y los resultados de las modelaciones hidráulicas). Ver anexo 3.

## **Futuros desarrollos.**

A continuación, una serie de propuestas de investigación que son tendientes a lograr complementar el trabajo aquí expuesto y a lograr mayor entendimiento integral de la macrorregión.

- Implementación de información satelital de precipitaciones y niveles en la zona: Contribuiría a complementar la cantidad y mejorar la calidad de información existente en el macrosistema.
- Validación a partir de modelación determinística de las metodologías con información escasa que utilizan sensores remotos para calibración: se requiere para ello medición en ciénagas, caños, el Mar Caribe, etc. En aras de implementar



de forma rigurosa la modelación matemática, permitiendo desde luego validar de mejor forma la metodología aquí propuesta.

- Intercambio ciénagas – río Magdalena y el Impacto del cambio climático en la producción pesquera y seguridad alimentaria de las poblaciones ribereñas y aledañas a las ciénagas, estudiando escenarios de calidad de agua: No son un secreto las reiteradas noticias sobre mortandad de peces, por ejemplo, en la CGSM, para lo cual una modelación integrada de la calidad de agua de todo el hidrosistema aportaría sobre medidas de solución futuras.
- Evaluación general de las estructuras de control de inundaciones en la zona baja del río Magdalena y su afectación en la dinámica natural de la zona: Se requiere para ello una mejor resolución de la información topográfica en la franja de estudio de inundación y se apoyaría en los resultados de la modelación 1D realizada para todo el macrosistema, como condición inicial.
- Evaluación del riesgo de inundación hacia Barranquilla y viabilidad del desvío de mayores caudales a la CGSM.
- Evaluación hidráulica de los canales de derivación a la CGSM, Caños Clarín, Aguas Negras y Renegado, secciones óptimas de diseño: En la modelación se tomaron como referencia los caños propuestos en 1993 y los cuales se consideran mantienen su funcionamiento, sin embargo, durante la modelación fue evidente que en algunos casos estos no cuentan con la capacidad hidráulica suficiente, lo cual, genera desbordamiento.



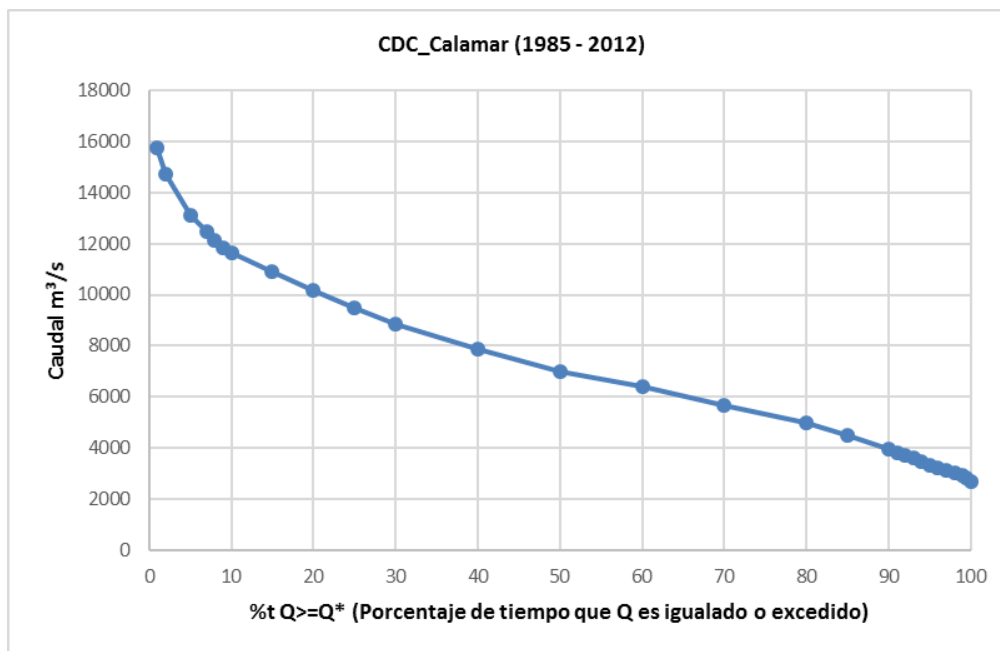
**Anexo 1: Resumen información  
climatológica recibida, CDC  
elaborada.**

**Tabla 6-1:** Resumen de información hidrológica y climatológica recibida (IDEAM).

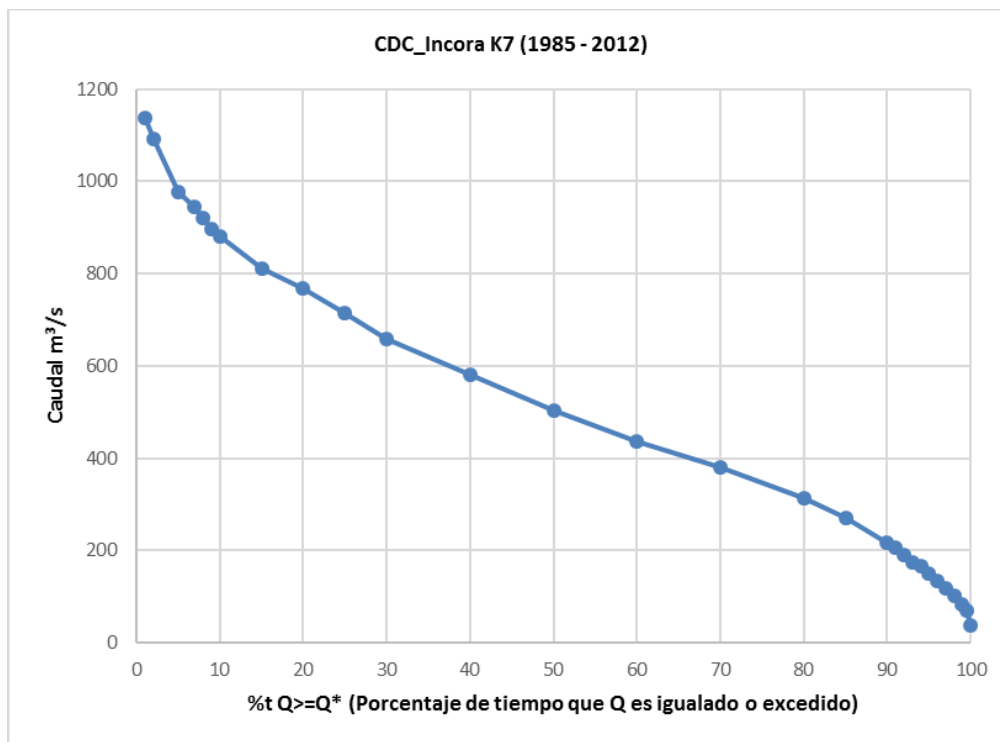
CODIGO	NOMBRE	NÚMERO PARAMETRO	TIPO Y AÑOS		Tipo de estación	Recibida	Comentario
			Mensual	Multianual			
29037020	CALAMAR	20-21-22-23-24-25-32	Diaria y mensual	2012 al 1940	LM	SI	
29047070	SAN PEDRITO AUTOMATICA	20-21-22-23-24-25-32	Horaria y diaria	2012 al 1978	LG	SI	
29037360	INCORA K-7	20-21-22-23-24-25-32	Horaria y diaria	2012 al 1972	LG	SI	
29047060	PLANTA EL RIO	20-21-22-23-24-25-32	Horaria y diaria	1988 al 1978	LG	SI	
29047080	DARSENA BARRANQUIL	20-21-22-23-24-25-32	Horaria y diaria	2012 al 2006	LG	SI	
29047040	CASA DE PILOTOS T	20-21-22-23-24-25-32	Diaria y mensual	1969 al 1965	LG	SI	Inf Diaria
29045090	MALAMBITO	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	1978 al 1969	CO	SI	Precipitación
29040270	RABON EL HDA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1978	PM	SI	
29037230	BOQUITAS	20-21-22-23-24-25-32	Diaria y mensual	1986 al 1984	LM	SI	
29040250	CAMPO DE LA CRUZ	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1978	PM	SI	
29035120	LIMON EL	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	2012 al 1965	CO	SI	
29040260	CANDELARIA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1976	PM	SI	
29035080	NORMAL MANATI	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	2012 al 1963	CP	SI	
29040300	PTO GIRALDO	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1978	PM	SI	
29040200	LENA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1969	PM	SI	
29040290	CAMPANOS LOS	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1978	PM	SI	
29035060	VERACRUZ	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	1977 al 1963	CO	SI	Precipitación
29030140	SAN JOSE	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1987	PM	SI	
29040070	PONEDERA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1959	PM	SI	
29040190	SABANALARGA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1959	PM	SI	
29035050	BELLA FUENTE	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	1971 al 1963	CO	SI	Precipitación
29040020	MONTEBELLO	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1985	PM	SI	
29040240	USIACURI	1-2-3	Horaria y diaria	2012 al 1964	PG	SI	Inf Diaria
29040410	USIACURI	1-2-3	Horaria y diaria	1971 al 1963	PG	SI	Inf Diaria
29040080	POLONUEVO	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1959	PM	SI	
29045110	JUAN DE ACOSTA	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	1971 al 1964	CO	SI	
29045020	APTO E CORTISSOZ	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	2012 al 1940	SP	SI	
29045100	BASE NAVAL	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	1992 al 1973	CO	SI	Precipitación
29045120	FLORES LAS	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	2012 al 1971	CP	SI	
29050010	TIOGOLLO	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1982	PM	SI	
29060540	SAN RAFAEL	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1982	PM	SI	
29060030	BONGO EL	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1975	PM	SI	
29060180	ESPERANZA LA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1975	PM	SI	
29060170	GAVILAN	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1967	PM	SI	
29060350	BAYANO	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1975	PM	SI	
29060270	PALO ALTO	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1967	PM	SI	
29060190	FLORIDA LA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1973	PM	SI	
29060210	PALMA LA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1967	PM	SI	
29060310	SEVILLANO	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1979	PM	SI	
29060280	SAN ISIDRO	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1967	PM	SI	
29060160	ENANO EL	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1974	PM	SI	
29060550	RUBY EL	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1984	PM	SI	
29060230	SARA LA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1971	PM	SI	
29060250	PROYECTOS LOS	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1967	PM	SI	
29060240	UNION LA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1967	PM	SI	
29060140	CARMEN EL	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1967	PM	SI	
29060150	DESTINO EL	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1967	PM	SI	
29060200	MARIA LA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1974	PM	SI	
29060040	FUNDACION	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1958	PM	SI	
29065030	PRADO SEVILLA	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	2012 al 1970	CO	SI	Precipitación
29060560	DONA MARIA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1984	PM	SI	
28040100	MONTERRUBIO	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1963	PM	SI	
29020020	GARRAPATA	1-2-3	Diaria y mensual	2012 al 1984	PM	SI	
29065080	MEDIA LUNA	1-3-4-5-6-10-11-12	Diaria y mensual	2012 al 1984	CO	SI	
29067120	FUNDACION	20-21-22-23-24-25-32	Diaria y mensual	2012 al 1958	LM	SI	
29067130	PTE FERROCARRIL	20-21-22-23-24-25-32	Diaria y mensual	2012 al 1965	LM	SI	
29067010	EL TREBOL	20-21-22-23-24-25-32	Diaria y mensual	2012 al 1965	LG	SI	

**PARÁMETROS HIDROCLIMATOLÓGICOS DISPONIBLES**

- |                              |                             |                              |                              |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1.PRECIPITACION TOTALES (mm) | 2. PRECIPITACION No. DIAS   | 3. PRECIPITACION MAX. 24/HRS | 4.TEMPERATURA MEDIA (°C)     |
| 5.TEMPERATURA MÁXIMA (°C)    | 6.TEMPERATURA MINIMA (°C)   | 10. HUMEDAD RELATIVA (%)     | 11.EVAPORACIÓN (mm)          |
| 12.BRILLO SOLAR (horas)      | 20.CAUDALES MEDIOS (m³/seg) | 21.CAUDALES MAXIMOS (m³/seg) | 22.CAUDALES MINIMOS (m³/seg) |
| 23.NIVELES MEDIOS            | 24.NIVELES MÁXIMOS          | 25.NIVELES MINIMOS           | 32. RESUMEN AFOROS LÍQUIDOS  |



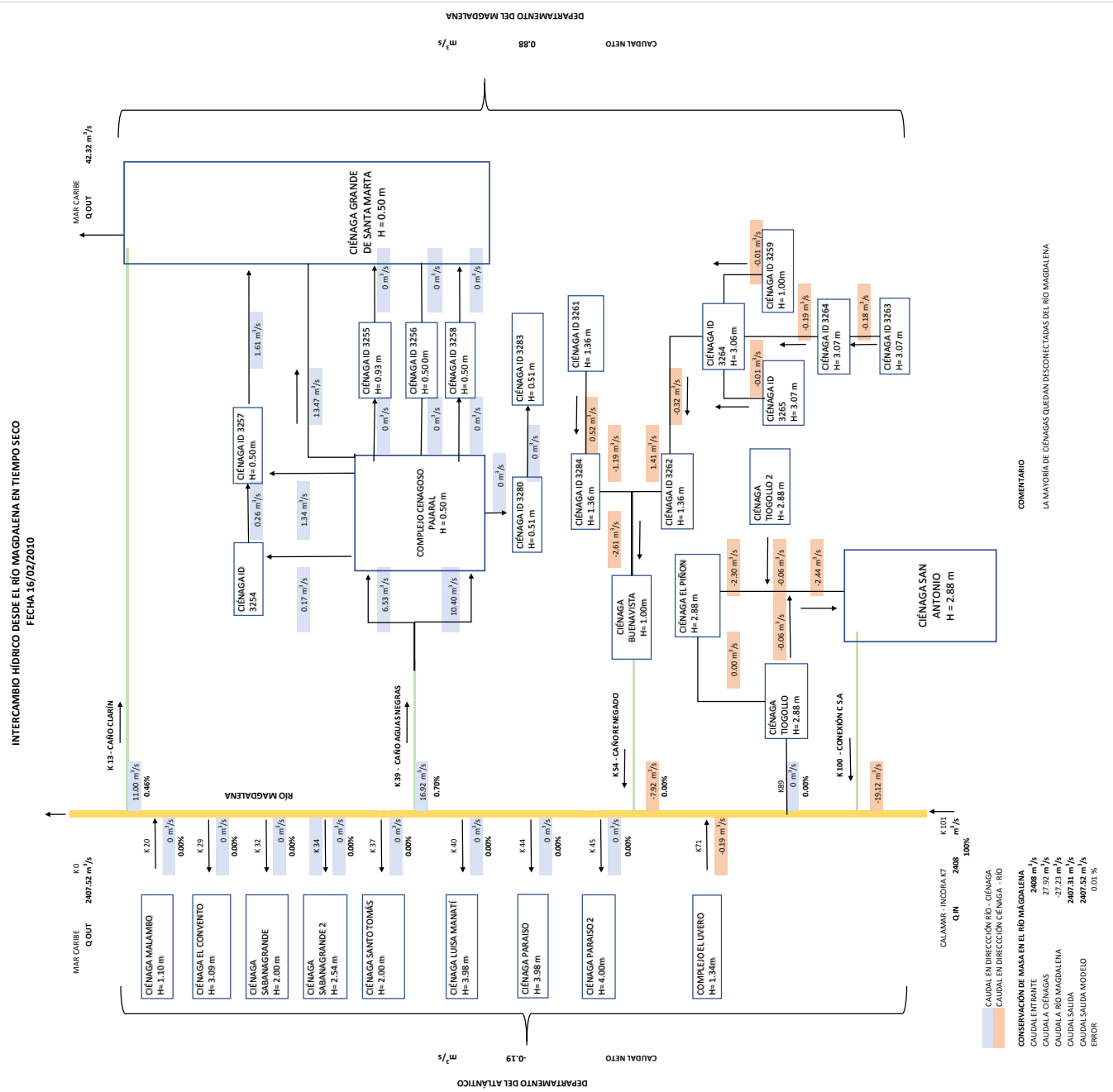
**Figura 6-3:** Curva de duración de caudales (CDC) estación Calamar. Fuente: Elaboración propia.



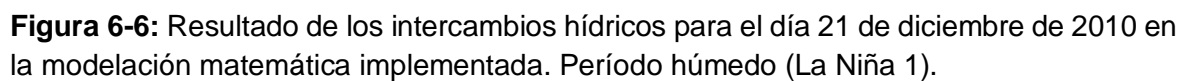
**Figura 6-4:** Curva de duración de caudales (CDC) estación Incora K7. Fuente: Elaboración propia.

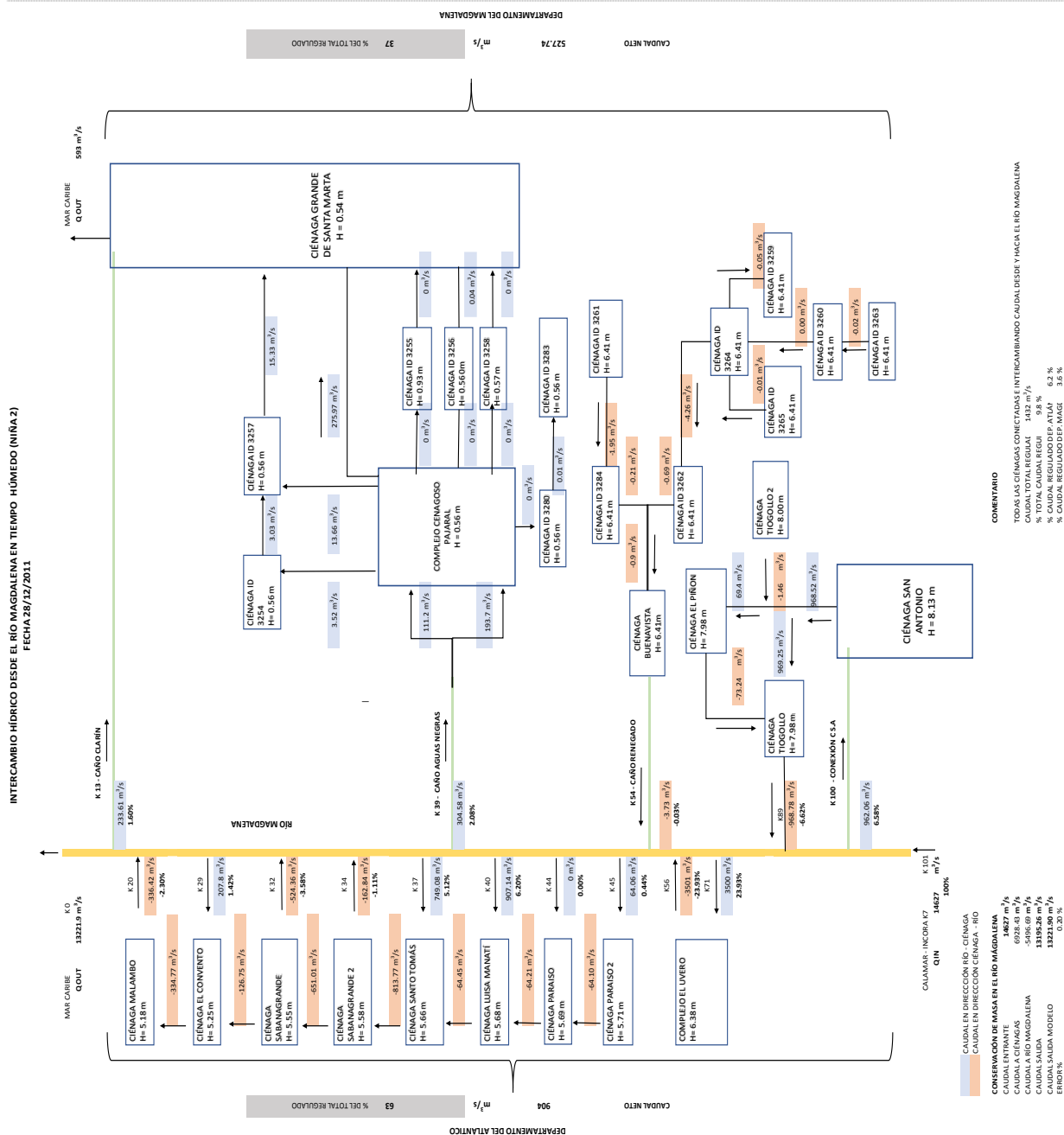


## **Anexo 2: Infogramas de intercambios hídricos.**





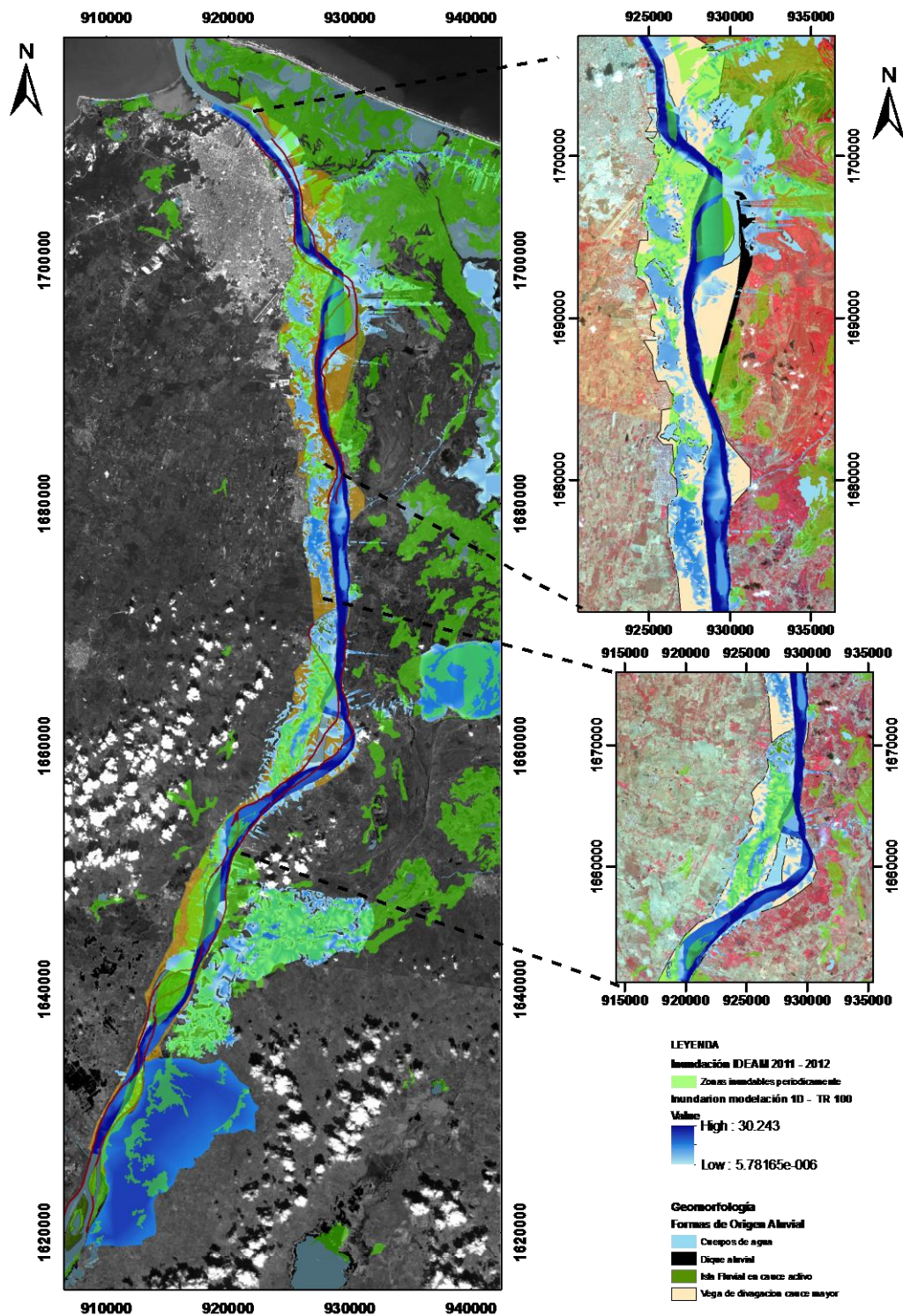




**Figura 6-7:** Resultado de los intercambios hídricos para el día 28 de diciembre de 2011 en la modelación matemática implementada. Período húmedo (La Niña 2).

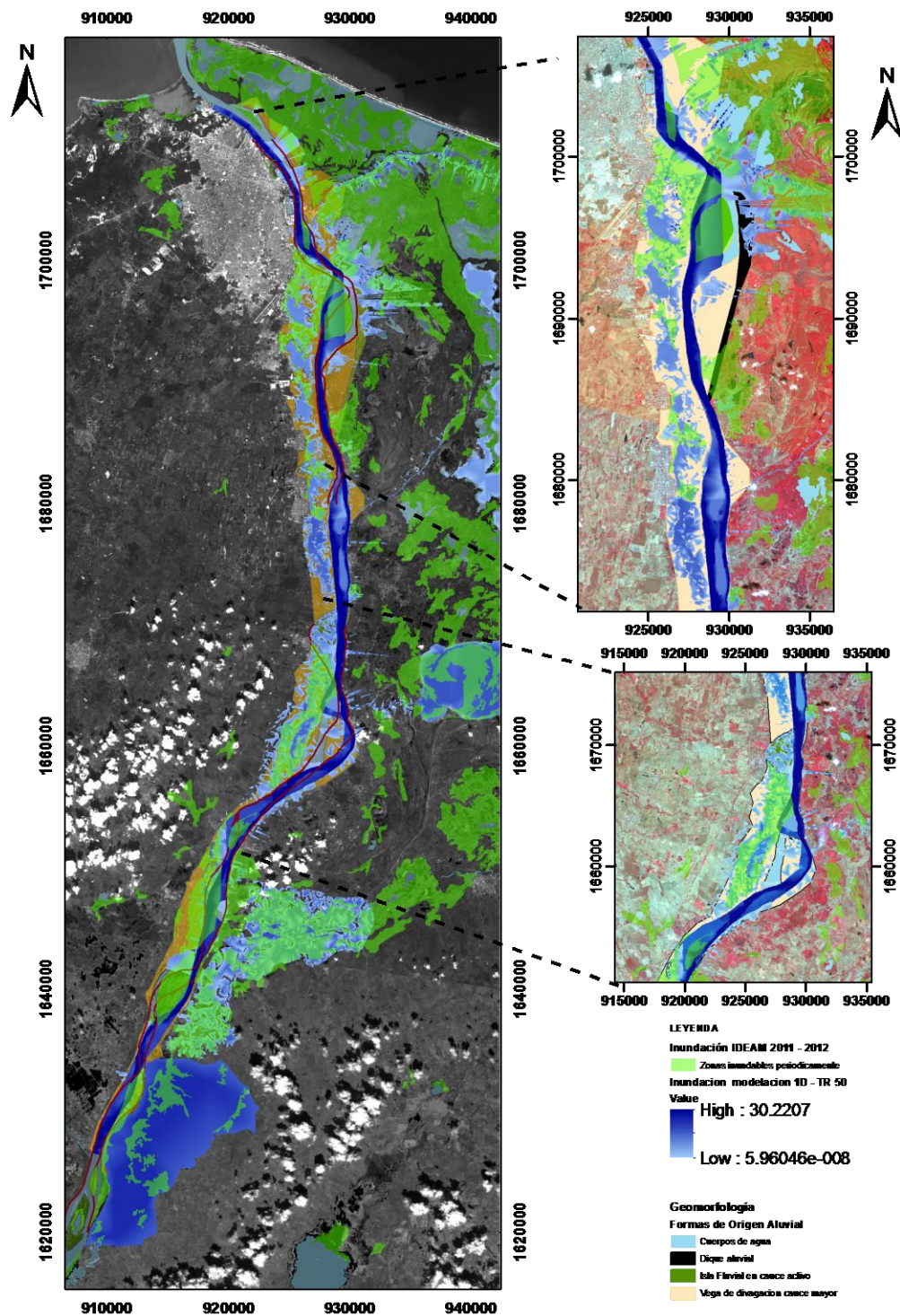
**Anexo 3: Mapas de zonas susceptibles  
a inundación, propuesta delimitación  
complejo cenagoso del Atlántico,  
recomendación estaciones  
hidrológicas de medición en el  
macrosistema Bajo Magdalena.**

18. Estudio a escala regional de los componentes hidrológicos e hidráulicos del complejo cenagoso del Bajo Magdalena ente Calamar y Bocas de Ceniza con apoyo de modelación matemática y SIG

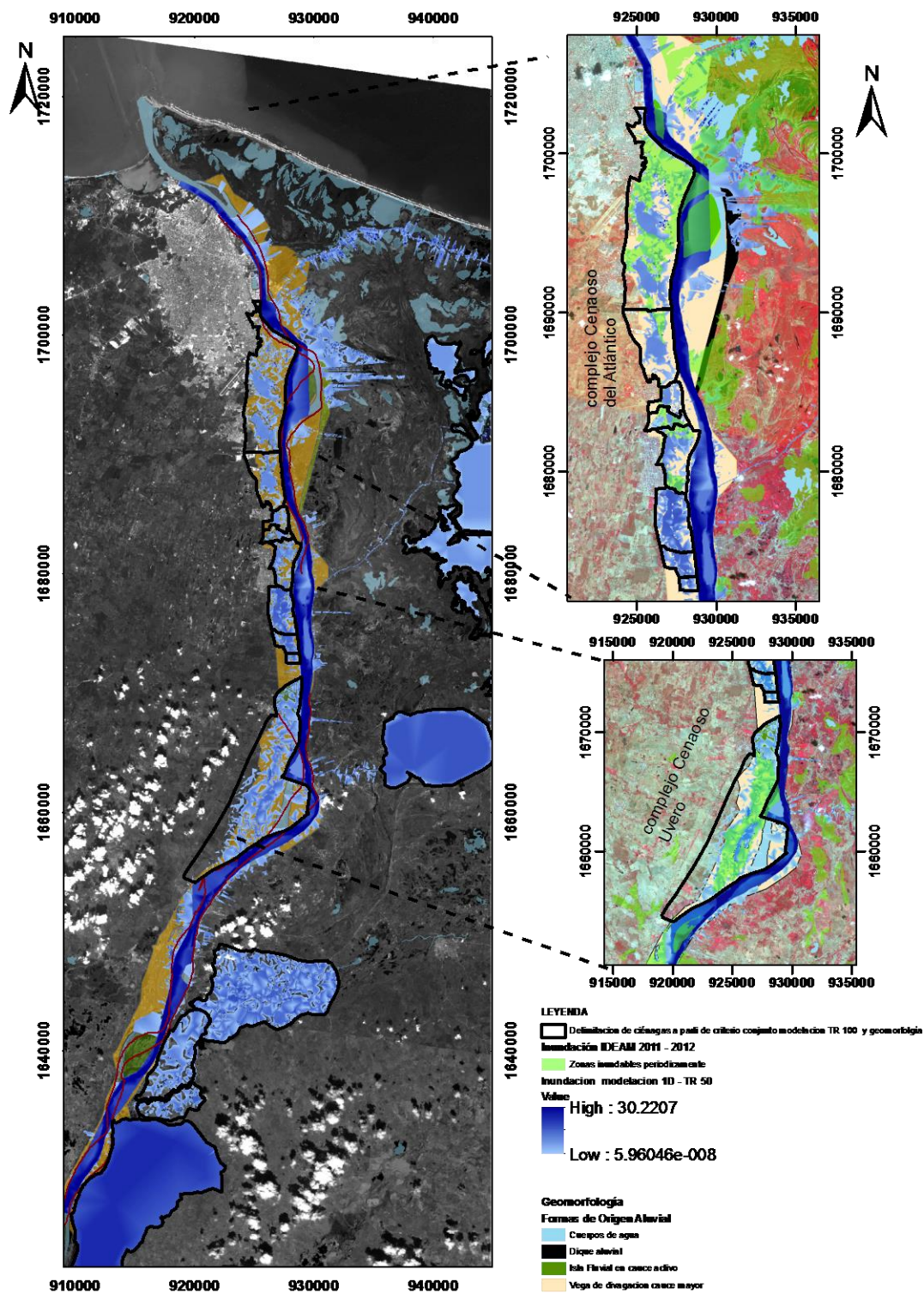


**Figura 6-8:** Resultado mancha de inundación modelación matemática 1D (TR 100) + inundación por geomorfología Vs Zona inundación periódica IDEAM (2011-2012).



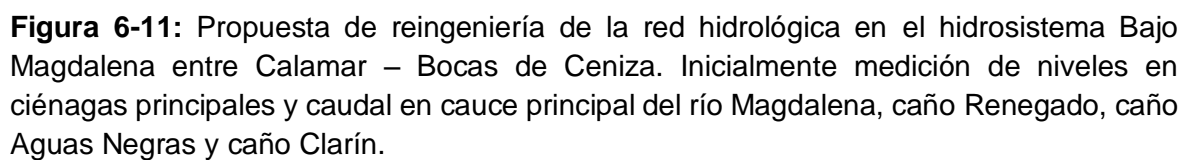


**Figura 6-9:** Resultado mancha de inundación modelación matemática 1D (TR 50) + inundación por geomorfología Vs Zona inundación periódica IDEAM (2011-2012).



**Figura 6-10:** Propuesta de delimitación de ciénagas del costado occidental a partir del criterio conjunto geomorfología y modelación matemática TR 100 años.









# Bibliografía

- Amador, F. (2013) Development of a Methodology for Producing Probabilistic Flood Maps of River-Wetland Systems: Case Study of Magdalena River, Colombia.
- Arbelaez, J. S. (2010) Evaluación de herramientas informáticas para el análisis de amenaza por inundaciones.
- Aronica, G., Bates, P. D., and Horritt, M. S. (2002) Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. Hydrological processes, **16**(10), 2001 – 2016.
- Di Baldassarre, G. (2012) *Floods in a Changing Climate - Inundation Modelling*,
- Di Baldassarre, G. Di, Schumann, G., and Bates, P. D. (2009) A technique for the calibration of hydraulic models using uncertain satellite observations of flood extent. Journal of Hydrology, **367**(3–4), 276–282. [online]  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.020>.
- Bedient, P., Huber, W., and Vieux, B. (2008) *Hydrology and floodplain analysis*, Prince Hall.
- Betancourt, M. and Ramirez-Triana, G. (2005) Boletín de investigaciones marinas y costeras - Estudio de los procesos relacionados con la presencia de plaguicidas organoclorados en la Ciénaga Grande de Santa Marta (F. Arias, J. Garay, and O. Solano, eds.). INVEMAR, **34**, 274.
- Beven, K. (2011) *Rainfall-Runoff Modelling The Primer*,
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Dolz, J., and Coll, A. (2012) Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, (xx). [online]  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.
- Bladé, E., Gómez-Valentín, M., Dolz, J., Aragón-Hernández, J. L., Corestein, G., and Sánchez-Juny, M. (2012) Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels. Advances in Water Resources, **42**, 17–29. [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170812000760> (Accessed March 31, 2015).
- Brunner, G. W. (2016) HEC-RAS River Analysis System. , (February).
- Campbell, J. B. and Wynne, R. H. (2011) *Introducción to Remote Sensing*, THE GUILFORD PRESS.
- Consorcio Dique (2005) *Informe estudio hidrológico CD.ID.113.HIDR.INF.00-003-0*,

Bogotá.

- CORMAGDALENA (2007) *Atlas de la cuenca Magdalena-Cauca*, Bogotá D.C.
- CORMAGDALENA-UNAL (2007) *Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de la navegación del Canal del Dique*, Bogotá D.C.
- CORMAGDALENA-UNINORTE (2007) Actualización de la caracterización hidráulica y sedimentológica del río Magdalena para los estudios e investigaciones de el canal navegable de acceso al puerto de Barranquilla entre Bocas de Ceniza (K0) y Puente Pumarejo (K22).
- CORPAMAG-DNP-PROCIÉNAGA (1993) *Plan de recuperación del complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta - Análisis de alternativas*, Santa Marta.
- CRA (2007) *Documentación del estado de las cuencas hidrográficas en el departamento del Atlántico*,
- Díaz-Granados, M., Camacho, L. A., and Maestre, A. (1996) Modelación de Balances Hídricos de ciénagas fluviales y costeras colombianas. *Revista de Ingeniería* (versión electrónica) No1., 2–20.
- DNP-UNAL (2012) *Estudios, análisis y recomendaciones para el ordenamiento ambiental y el desarrollo territorial de la Mojana*, Bogotá D.C.
- Dutta, D., Teng, J., Vaze, J., Lerat, J., Hughes, J., and Marvanek, S. (2013) Storage-based approaches to build floodplain inundation modelling capability in river system models for water resources planning and accounting. *Journal of Hydrology*, **504**, 12–28. [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413006860> (Accessed June 2, 2015).
- FEMA (2009) *Federal Emergency Management Agency - Flood maps.*, [online] [//msc.fema.gov](http://msc.fema.gov).
- Figueroa Ortiz, C. A. (2016) Caracterización del campo de precipitación sobre la microcuenca urbana del campus Universidad Nacional de Colombia - sede Bogotá.
- Gao, H., Birkett, C., and Lettenmaier, D. P. (2012) Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing data products in comparison with gauge observations for the five largest reservoirs in the. , **48**(February), 1–12.
- García-Pintado, J., Mason, D. C., Dance, S. L., Cloke, H. L., Neal, J. C., Freer, J., and Bates, P. D. (2015) Satellite-supported flood forecasting in river networks: A real case study. *Journal of Hydrology*, **523**, 706–724. [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415001031> (Accessed June 2, 2015).
- Hingray, B., Picouet, C., and Musy, A. (2014) *Hydrology: A Science for Engineers*,
- Horritt, M. S. and Bates, P. D. (2001) Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. , **253**.
- Horritt, M. S. and Bates, P. D. (2002) Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. , **268**, 87–99.

- Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., and Wilson, M. D. (2007) Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Geomorphology*, **90**(3–4), 208–225.
- IDEAM (1995) *Regionalización de crecientes máximas*, Bogotá D.C.
- IDEHA-Cormagdalena (2012) Evolución morfológica al comportamiento de las orillas y canal navegable utilizando el modelo MIKE -21C, informe final. , **Informe fi**, 98.
- INVEMAR (2013) Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. , 163.
- Javaheri, A. and Babbar-Sebens, M. (2014) On comparison of peak flow reductions, flood inundation maps, and velocity maps in evaluating effects of restored wetlands on channel flooding. *Ecological Engineering*, **73**, 132–145. [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857414004194> (Accessed June 2, 2015).
- MADS (2013) *Guía técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS*, Bogotá D.C.
- MARM (2011) *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables* (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, ed.), Madrid.
- Mason, D. C., Bates, P. D., and Amico, J. T. D. (2009) Calibration of uncertain flood inundation models using remotely sensed water levels. *Journal of Hydrology*, **368**(1–4), 224–236. [online] <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.034>.
- MAVDT (2010) *Política Nacional para la Gestión del Recurso Hídrico* (G. de R. H. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Viceministerio de Ambiente, Dirección de Ecosistemas, ed.), Bogotá D.C. [online] [http://www.minambiente.gov.co/documentos/5774\\_240610\\_libro\\_pol\\_nal\\_rec\\_hidrico.pdf.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/5774_240610_libro_pol_nal_rec_hidrico.pdf.pdf).
- Menéndez, M. and Núñez, V. (2009) *Uso de los Sensores Remotos en los Recursos Naturales*, Salta, Universidad Nacional de Salta - Argentina.
- Mesa, O. J. et al. (1997) *Introducción al clima de Colombia*, Medellín, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Múnera, J. C., Vélez, J. I., Poveda, G., Posada, J. E., Montoya, J. D., and Cardona, Y. M. (2003a) Dinámica hidrológica de la ciénaga grande de Santa Marta. *Avances en recursos hidráulicos*, **10**(1), 47–62. [online] [http://www.bdigital.unal.edu.co/6096/1/No.\\_10-2003-4.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/6096/1/No._10-2003-4.pdf).
- Múnera, J. C., Vélez, J. I., Poveda, G., Posada, J. E., Montoya, J. D., and Cardona, Y. M. (2003b) *Dinámica hidrológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta*, Bogotá D.C.
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., and Williams, J. . (2011) *Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute, TR-406, 1–647.
- Olaya, V. (2011) *Sistemas de Información Geográfica*, [online] [http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro\\_SIG](http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG).

- OMM (2011) *Guía de prácticas hidrológicas\_ Volumen II\_ Gestion de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*,
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., and Blazkova, S. (2005) Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, **302**(1–4), 46–69. [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169404003294> (Accessed May 20, 2015).
- Poveda, G. (2004a) “CAUDALES MÍNIMOS EN COLOMBIA: RELACIONES MACROCLIMÁTICAS, ESCALAMIENTO Y BALANCES HIDROLÓGICOS” in CAUDALES MÍNIMOS EN COLOMBIA: RELACIONES MACROCLIMÁTICAS, ESCALAMIENTO Y BALANCES HIDROLÓGICOS.
- Poveda, G. (2004b) “No Title” in CAUDALES MÍNIMOS EN COLOMBIA: RELACIONES MACROCLIMÁTICAS, ESCALAMIENTO Y BALANCES HIDROLÓGICOS.
- Poveda, G., Gil, M., and Quiceno, N. (1998) El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO.pdf. *Bulletin Institute Francaise d’Etudes Andines*, **27**(3), 721–731.
- Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O. J., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R. I., Mejía, J. F., Hoyos, C. D., Ramírez, J. M., Ceballos, L. I., Zuluaga, M. D., Arias, P. A., Botero, B. A., Montoya, M. I., Giraldo, J. D., and Quevedo, D. I. (2007) Linking Long-Term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia. , **12**(1), 4–13.
- Sarhadi, A., Soltani, S., and Modarres, R. (2012) Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology*, **458–459**, 68–86. [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412005380> (Accessed February 15, 2015).
- Schultz, G. A. and Engman, E. T. (2001) *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*, Berlin, Springer.
- Short, N. M. and Jr, R. W. B. (1986) *Geomorphology from Space*, Washington, D.C, NASA Spetial Publication 486, Superintendent of Documents.
- Silva, S. (2015) Una propuesta técnica para el fortalecimiento de la normatividad colombiana en relación con la definición de ronda hidráulica.
- Sturm, T. W. (2001) *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill.
- Tamiru Haile, A. (2005) Integarting Hydrodynamic Models and High Resolution DEM (LiDAR) For Flood Modelling. *ITC*, **53**(9).
- Turc, L. (1955) Le bilan d’eau des sois: relation entre les precipitations, l’évaporation et l’écoulement. Versailles. Institut National de la Recherche Agronomique, Labotatorie des Sols.
- U. del Magdalena (2011) *Convenio 01 de 2011 fase de diagnóstico*,
- U.S. Army Corps of Engineers (2000) *Hydrologic Modeling System*. , (March), 158.

- U.S. Water Resources Council (1982) Guidelines for Determining Flood Flow Frequency. Bulletin 17B: Reston, Virginia, Hydrology Subcommittee, Office of Water Data Coordination, U.S. Geological Survey, 182.
- UNAL-MED (2011) *HidroSIG 4.0*,
- Vargas Cuervo, G. (2015) *Guía y Catálogo de Unidades Geomorfológicas en Colombia por Sensores Remotos*, Bogotá D.C, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
- Warren Viessman, J. and Gary L., L. (2008) *Introduccion to Hydrology* (Prince-Hall, ed.),
- Werner, M. G. F. (2001) Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, **26**(7–8), 517–522. [online]  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464190901000430> (Accessed June 2, 2015).
- Zhang, S., Guo, Y., and Wang, Z. (2015) Correlation between flood frequency and geomorphologic complexity of rivers network – A case study of Hangzhou China. *Journal of Hydrology*, **527**, 113–118. [online]  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415003194> (Accessed May 27, 2015).